

공학석사 학위논문

생산 라이저의 건전성 평가에 대한 연구

A study on Integrity Estimation for Production Riser

지도교수 박 수 용

2015년 2월

한국해양대학교 대학원

해 양 건 축 공 학 과

제 현 민

본 논문을 제현민의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장

송 화 철 (인)

위 원

박 수 용 (인)

위 원

박 동 천 (인)

2014년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii

1. 서 론

1.1 연구 배경	1
1.2 연구의 필요성 및 목적	3
1.3 연구 동향	4
1.4 연구 범위와 내용	6

2. 해양 생산 라이저 시스템

2.1 개요	9
2.2 해양 생산 라이저의 분류	10
2.2.1 Top Tensioned Riser	10
2.2.2 Compliant Riser	11
2.2.3 Steel Catenary Riser	13
2.3 라이저의 재료	14
2.3.1 강관 파이프(Metallic Pipe)	14
2.3.2 유연 파이프(Flexible Pipe)	14
2.4 라이저의 주요 구성품	16
2.4.1 Flex joint	16
2.4.2 Ball joint	16
2.4.3 Bend Stiffeners	17
2.4.4 Bending Restrictor	17
2.4.5 Tapered Stress joint	17

2.4 라이저의 주요 하중	18
2.5.1 일반하중 및 압력하중	18
2.4.2 환경하중	19
2.4.3 사고하중	21
3. 라이저 모니터링 사례 분류	
3.1 라이저의 파손 사례	22
3.1.1 Flex joint 파손	22
3.1.2 Taperd Stress joint 파손	23
3.1.3 Flexible Riser 파손	24
3.2 생산 라이저의 모니터링 사례	26
3.2.1 Top Tensioned Riser 사례	26
3.2.2 Steel Catenary Riser 사례	30
4. 라이저의 건전성 평가 기법 선정	
4.1 개요	34
4.2 손상탐지 기법 분류	35
4.2.1 고유진동수의 변화를 이용한 기법	35
4.2.2 모드형상 변화를 이용한 기법	36
4.2.3 모드형상의 곡률 변화를 이용한 기법	37
4.2.4 변형 에너지를 이용한 기법	38
4.3 손상 위치 추정 기법	40
4.4 수치해석을 통한 라이저의 손상탐지 기법 선정	41
4.4.1 수치해석 모델링 및 모의손상	41
4.4.2 기법별 손상탐지 결과	43
5. 라이저 건전성 평가의 실용성을 위한 센서 개수 선정	
5.1 수치해석 모델링	54
5.2 모의 손상 시나리오	55

5.3 수치해석 모델의 손상탐지 및 센서 개수 선정	57
5.3.1 고유진동수 및 모드형상	57
5.3.2 손상탐지 결과	57
5.3.3 센서 개수 선정	63
 6. 결론	 66
 참고문헌	 68



List of Tables

Table 1 Top Tensioned Riser의 모니터링 사례 정리	29
Table 2 Steel Catenary Riser의 모니터링 사례 정리	33
Table 3 레벨별 손상탐지 기법 분류	34
Table 4 측정 응답별 손상탐지 기법 분류	35
Table 5 손상탐지 기법의 장·단점	39
Table 6 수치해석 모델링 제원	41
Table 7 손상 경우별 모의 손상 부재 및 손상도	42
Table 8 손상 경우별 고유진동수	43
Table 9 손상 경우별 고유진동수의 상대변화율	43
Table 10 손상 경우별 MAC 값	44
Table 11 Percentage of false positive error & false negative error	53
Table 12 센서 개수에 따른 손상 경우별 손상 위치 및 손상도	55
Table 13 수치해석 모델의 손상 경우별 고유진동수	57
Table 14 손상탐지 성능평가 기준	63
Table 15 센서 개수에 따른 손상 탐지 결과 성능	64

List of Figures

Fig. 1 세계 해양 산업 규모	2
Fig. 2 Standalone Type의 센서 모듈	5
Fig. 3 연구 수행 체계	7
Fig. 4 해양 생산 플랫폼 시스템	9
Fig. 5 Top Tensioned Riser	10
Fig. 6 Compliant Riser의 분류	11
Fig. 7 Steel Catenary Riser	13
Fig. 8 비결합 유연 파이프 구조	15
Fig. 9 결합 유연 파이프 구조	15
Fig. 10 Flex joint의 구조 및 설치 모습	16
Fig. 11 Bend Stiffener	17
Fig. 12 Tapered Stress joint	18
Fig. 13 Flex joint의 피로 균열 파손	23
Fig. 14 Tapered Stress joint의 상부 플랜지 가스 유출	23
Fig. 15 Tapered Stress joint의 상부 플랜지 목 부분의 균열	24
Fig. 16 Tensile Armour의 파손에 의한 비틀림 형상	25
Fig. 17 Tensile Armour의 단부 와이어 파손	25
Fig. 18 I-tube의 외부 피복 손상	25
Fig. 19 Top Tensioned Riser의 주요 섹션	26
Fig. 20 BP's Nyk High 플랫폼에 연결된 라이저의 전역적 모니터링 시스템	27
Fig. 21 Chikyu FPSO에 연결된 라이저의 전역적 모니터링 시스템	28
Fig. 22 Steel Catenary Riser의 주요 섹션	30
Fig. 23 Petrobras VIII에 연결된 라이저의 Pipe line 섹션의 모니터링 시스템	31
Fig. 24 Hang-off, Touch Down Zone, Pipe line 섹션의 모니터링 시스템	31
Fig. 25 Total's Akpo FPSO에 연결된 라이저의 Flex joint, Touch Down Zone 섹션의 모니터링 시스템	32
Fig. 26 수치해석 모델링 형상	41
Fig. 27 손상 경우별 모의 손상 위치	42

Fig. 28 수치해석 모델의 모드형상 1-3	44
Fig. 29 COMAC 값을 이용한 손상탐지 결과	45
Fig. 30 손상 경우 1-3의 모드형상 곡률 및 손상탐지 결과	46
Fig. 31 손상 경우 4의 모드형상 곡률 및 손상탐지 결과	47
Fig. 32 손상 경우 5의 모드형상 곡률 및 손상탐지 결과	47
Fig. 33 손상 경우 6의 모드형상 곡률 및 손상탐지 결과	48
Fig. 34 손상 경우 1의 손상탐지 결과	49
Fig. 35 손상 경우 2의 손상탐지 결과	49
Fig. 36 손상 경우 3의 손상탐지 결과	50
Fig. 37 손상 경우 4의 손상탐지 결과	50
Fig. 38 손상 경우 5의 손상탐지 결과	51
Fig. 39 손상 경우 6의 손상탐지 결과	51
Fig. 40 수치해석 모델링	54
Fig. 41 센서 개수별 센서 배치도 및 손상 위치	56
Fig. 42 손상 전 모드형상 1-3	57
Fig. 43 센서 개수 7개인 경우 손상탐지 결과	58
Fig. 44 센서 개수 9개인 경우 손상탐지 결과	59
Fig. 45 센서 개수 11개인 경우 손상탐지 결과	60
Fig. 46 센서 개수 13개인 경우 손상탐지 결과	61
Fig. 47 센서 개수 16개인 경우 손상탐지 결과	62

A study on Integrity Estimation for Production Riser

Je, Hyun Min

Department of Ocean Architectural Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

The purpose of this study is to provide appropriate methodology to ensure the safety and integrity of the production riser. In order to select integrity estimation methodology for production riser, level I and II Non-destructive Damage Evaluation (NDE) methods that were applied to existing structure are classified and reviewed. Numerical analysis is performed to verify the applicability and damage detection capability of reviewed methods. As a result, damage detection methodology using modal strain energy is more sensitive in detection of the damage than other methods.

In practice, the number of sensors is limited due to environmental and financial conditions. The impact on damage detection performance by reducing the number of sensors is systematically investigated through a series of numerical analyses and the results are discussed. The optimal sensor placement for the integrity estimation of production riser is recommended.

KEY WORDS: Structural Integrity Estimation 구조 건전성 평가; Production Riser 생산 라이저; Damage Detection 손상 탐지

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

전 세계는 현재 심각한 자원 부족현상에 직면하고 있으며, 향후 20년간 30억 명에 달하는 신흥국의 중산층 수요 증가로 2035년까지 1차 에너지 수요는 40% 가량 늘어날 것으로 전망하고 있다(배영일, 2011). 이러한 자원 부족현상으로 인해 일부 자원부국을 중심으로 자원민족주의가 부상하고 있으며, 일부 자원을 무기화하는 사례도 속출하고 있다. 특히 1973년 발생한 중동 전쟁으로 유발된 제1차 석유파동과 1978년에 발생한 제2차 석유파동은 자원민족주의와 자원의 무기화를 보여주는 사례라고 할 수 있다. 또한 최근 2010년 9월, 동중국해 일부 섬들을 둘러싼 중국과 일본 간의 영유권 분쟁에서 일본이 중국 선원을 구금시키자 중국은 일본에 대한 희토류 수출금지라는 자원을 이용한 경제적 조치로 압박을 가한 사건이 발생했다. 이처럼 자원으로 인해 발생하는 갈등을 완화시킬 수 있는 해결 방안이 필요하며, 그 해결 방안으로 해양 자원이 주목받고 있다.

해양은 지구 표면의 71% 이상 차지하고 있으며 평균 수심은 약 3,800m에 달하는 광범위한 영역을 포함하고 있다. 또한 자원 부족 문제를 해결할 수 있는 막대한 자원이 매장되어 있는데 현재까지의 해양탐사 결과, 석유가 전 세계 매장량의 3분의 1 이상이 있고, 이 외에도 구리, 망간, 니켈, 코발트, 금, 아연 등의 주요 광물자원도 많은 양이 매장되어 있다. 해양 자원의 가치 상승에 따라 Fig. 1에서와 같이 해양 산업분야 중에 자원과 관련된 해양개발 분야와 해양 광물 개발이 2000년부터 2009년까지 연평균 증감률이 각각 12%, 10% 기록하며 높은 성장추세를 보이고 있다(한국해양수산개발원, 2009).

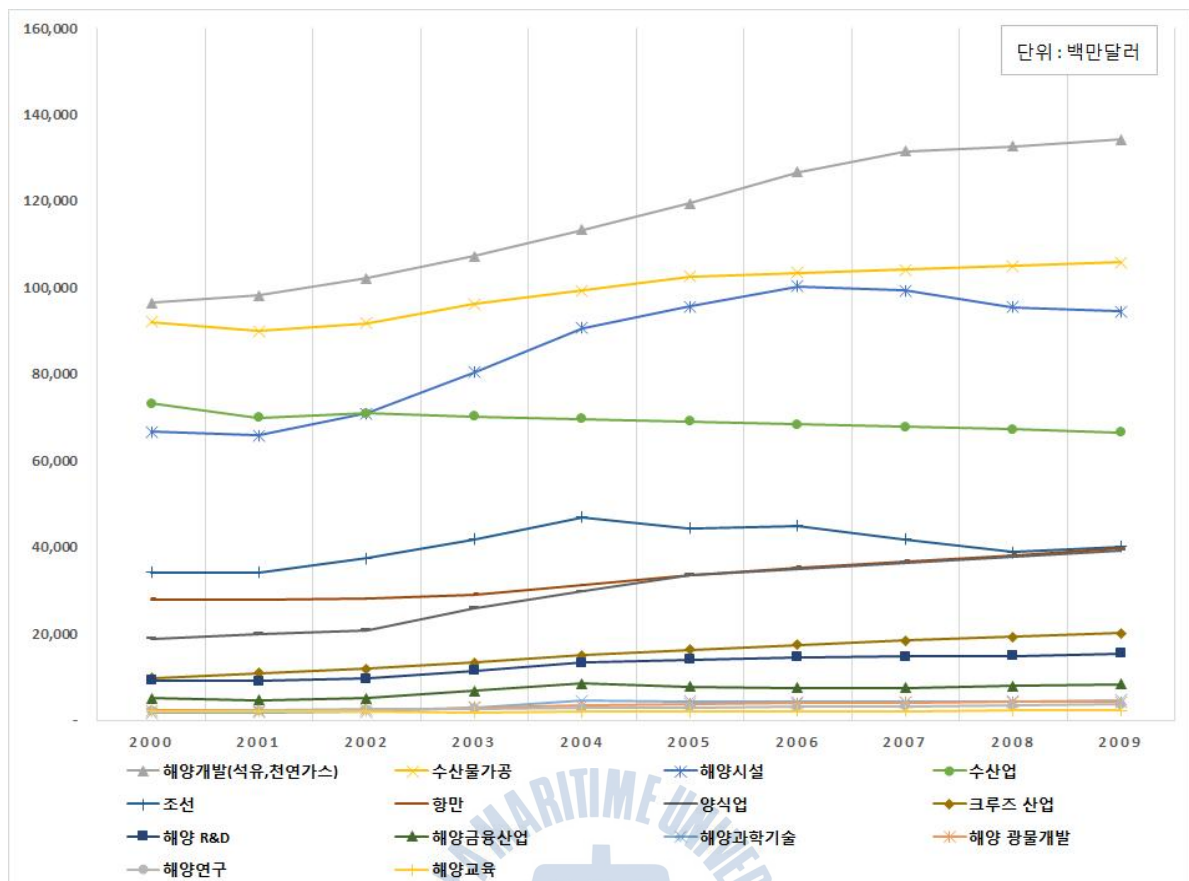


Fig. 1 세계 해양 산업 규모

이처럼 해양 자원들은 산업의 발달과 더불어 사용량이 증가하여 해양 개발이 본격화 되었고, 이로 인하여 비교적 개발이 쉬운 천해역의 자원들은 현재 고갈 상태에 이르게 되었다. 이에 따라 해양 자원개발은 환경 조건이 열악한 해역이나 수심 900m 이상의 심해역으로 개발 범위가 확장되고 있으며, 수심 3,000m 이하의 초심해까지 개발 범위가 넓어지고 있다. 특히 심해역에는 망간각, 망간 단괴, 해저열수광상, 메탄하이드레이트 고체가스 등의 다양한 광물들이 분포하고 있어 심해 자원개발을 위한 기술개발이 활발하게 이루어지고 있다(한국해양연구소, 1997).

해양 자원개발의 범위가 천해역에서 초심해역까지 영역이 확대됨에 따라서 자원 개발을 위한 해양 구조물의 종류도 변화하였다. 초기 천해역대에서는 주로 자켓 구조물과 같은 고정식 구조물을 사용하였으나 수심이 깊어짐에 따라 발생하는 비용 증가의 문제가 발생하였고, 비용 절감을 위해 반잠수식 플랫폼, 인장각식 플랫폼, 시추 선박 등과 같은 부유식 또는 유연식 구조물을 활용하게

되었다. 부유식 또는 유연식 구조물을 이용하여 해양 자원을 채취하는 경우 라이저(Riser)가 사용된다. 라이저란 해양 개발에 필수적인 구조물로 해저면과 해수면의 플랫폼을 연결하여 시추, 유체의 이송, 전기적인 연결, 그리고 수압 조절 등의 목적으로 이용되는 세장한 수직 파이프를 지칭한다(Seyed, 1989). 실해역에서 라이저는 수압과 자중, 부력체에 의한 인장력 등의 정적하중과 파력, 해류력, 상부 플랫폼의 움직임에 따른 관성력, 풍하중, 지진하중 등의 동적하중을 받게 된다. 이처럼 열악한 해양 환경 조건 속에서 지속적인 하중에 의해 작업 중 손상이나 파괴가 일어나게 되는 경우 인적, 경제적, 환경적으로 치명적인 피해가 발생된다. 2010년 4월 20일 멕시코 만에서 발생한 석유시추시설 폭발 사건은 라이저의 안전성에 대한 중요성을 부각시켰다. 사건 당시 직경 0.5m, 길이 1,600m의 라이저에 연결되어 있는 유정에 가스가 유입되어 폭발이 발생하면서 최악의 해상 기름 유출 사고를 일으키게 되었다. 이 사건으로 인해 미국정부는 약 490만 배럴의 원유가 유출된 것으로 추정하였고, 4만 8,000명의 인력과 6천900척의 선박, 약 4,000km에 이르는 오일 차단막이 투입되는 등 막대한 비용과 환경오염 문제를 유발하였다. 그 이후 해양 구조물의 안전성에 대하여 관심이 크게 고조되었고, 라이저의 지속적인 감시를 통하여 구조적 기능 저하를 조기에 감지하고 적절한 보수·보강을 통하여 건전성을 유지할 필요성이 제기되었다.

1.2 연구의 필요성 및 목적

구조물 건전성 모니터링(Structural Health Monitoring, SHM)은 여러 센서를 이용한 계측을 통해 구조물의 특성을 분석하여 구조물의 건전성을 평가하고 지속적으로 유지하고 관리하는 과정을 말한다. 일반적으로, 구조물 건전성 모니터링은 구조물의 물리적 특성 변화를 감지하는 범위와 방법에 따라 국부적 기법(Local method)과 전역적 기법(Global method)으로 분류될 수 있는데, 국부적 기법(Non-Destructive Testing, NDT)은 육안검사(Visual inspection), 초음파 검사(Ultrasonic), 방사선 탐상(Radiography), 전자기식(Electromagnetic), 누설자속 탐상법(Magnetic Flux Leakage, MFL) 등 국부적인 손상 검사를 직접 수행하는 기법들을 의미한다. 전역적 기법(Non-Destructive Evaluation, NDE)은 가속도, 변위, 변형률 등 측정된 구조물의 응답을 이용하여 구조물 전체의 강성 등 물

리적 특성 변화를 추적하는 기법이다. 전역적 기법은 정적 또는 동적응답을 모두 사용할 수 있지만, 특히 구조물의 지속적인 감시가 용이한 동적응답에 기반을 둔 기법이 선호되고 있다(Sohn, et al., 2004).

건전성 평가는 구조물의 동적 응답을 이용하여 항공·우주, 토목, 건축 등의 분야에서 수십 년간 활발한 연구가 진행되어 왔으나 해양 구조물의 경우, 자켓 구조물과 같은 고정식 구조물에 대해 적용한 사례는 있지만, 라이저에 대한 사례는 부족한 실정이다. 따라서 라이저의 손상으로 인해 인적, 물적, 환경적 피해를 예방하기 위해서 적절한 건전성 평가 기법에 관한 연구가 필요하다. 또한 건전성 평가를 통해 최종적으로 손상의 유무 탐지, 손상의 위치 및 정도를 파악하여 라이저의 노후화 정도 및 파손 위험을 미연에 방지해야 할 필요가 있다. 이와 같은 필요성에 의해 본 연구의 목적은 생산 라이저의 손상 탐지 및 위치 추정을 하는 건전성 평가 기법을 통해 라이저의 안전성 및 건전성을 확보할 수 있도록 하는 것이다.

1.3 연구 동향

해양 구조물의 건전성 평가 분야는 1970년대에 석유시추회사들을 중심으로 연구하였지만 플랫폼의 잡음에 의한 계측의 어려움, 극한 환경에서의 센서 설치의 어려움, 시간에 따른 기초 조건의 변동과 고차 진동모드를 발생시키는 파랑하중 등의 이유로 1980년대 초반에 건전성 평가 기술의 개발은 대부분 중단되었다(김두기, 2005).

최근 센싱 기술의 발달함에 따라 해양구조물에서 동적 응답을 성공적으로 취득하게 되었고, 이에 해양구조물에 대한 건전성 모니터링 기술에 관심이 집중되었다. 라이저에 관해서 과거부터 최근까지 수행되어온 연구들의 흐름은, 가장 단순한 형상과 재질을 가진 Top Tensioned Riser로부터 기초적인 연구를 시작하여 보다 어렵고 복잡한 Steel Catenary Riser와 유연 라이저로 발전해왔다. 라이저의 구조 건전성 모니터링 기법에 대한 연구는 미국, 유럽 등의 생산업체 중심으로 수행되고 있지만, 초기 단계이며 많은 연구가 필요한 상황이다. 국내에서도 많은 연구 개발이 이루어지고 있지만 대부분 라이저의 재료적 특성이나 설계 부재력 산정, 동적 응답해석 등으로 한정되어 진행되고 있으며, 건전성 및

안전성 확보에 대한 연구 진행은 전무한 상태이다.

해양 생산 플랫폼의 안전성 모니터링은 1987년에 처음 Joliet TLWP(Tension Leg Well Platform)의 인장각의 하중을 모니터링 하는 것으로 시작하였다. 이 하중을 통해 인장각의 중량 배분 관리 시스템을 적용하여 플랫폼의 안정성을 확보하고 더 나아가 하중 이력과 결함 검사를 동반하여 부재의 잔존 수명을 예측하는 시스템을 구축하였다(Peters, et al., 1990).

이후 1990년대부터 라이저는 Top Tensioned Riser, Steel Catenary Riser, 유연 라이저, 하이브리드 라이저 타워 등과 같이 플랫폼과 Wellhead를 연결하는 주요 장비로서 본격적으로 사용되게 되었다. 하지만 라이저는 복잡한 손상 매커니즘과 검사에 따른 고비용 때문에 영국 보건 안전청(Health and Safety Executive, HSE)에서는 1998년에 심해 개발에 대한 전역적 모니터링의 필요성을 강조하고 외부 육안 검사, 압력 시험, 하중 및 환경 모니터링, 건전성 모니터링, 방사선 탐상 등의 항목으로 라이저 모니터링을 위한 가이드라인을 제시하였다(HSE, 1998).

라이저 모니터링에 대한 관심과 수요는 커졌지만 전역적 감시를 위한 동적응답의 계측에는 어려움을 겪고 있는 실정이다. 많은 연구들에 의해 비용이 저렴하고 단순한 구조의 다양한 센서가 개발되었으며, 그 중 2H Offshore사에서는 Standalone 타입의 센서를 개발하였다(An, et al., 2003). Fig. 2의 센서 모듈은 온도, 압력, 가속도, 경사, 각속도 등의 모듈을 포함하고 있어 라이저의 거동을 편리하게 계측할 수 있도록 하였다.



Fig 2. Standalone Type의 센서 모듈

이러한 센서들의 개발에 따라 라이저의 전역적 모니터링의 기술은 현실화 되었고, BP사와 같은 석유 및 가스 개발회사가 멕시코만, 북해, 기니만, 브라질 인근의 대서양 등의 심해 라이저에 건전성 평가 시스템을 도입하게 되었다. Cook & Douglas(2006)의 연구에서는 라이저 시스템과 유사한 파이프라인과 Top-side 장비에 사용되는 모니터링 사례를 분석하였고, 벤치마킹을 통해 멕시코만에 있는 BP사의 생산 라이저에 적용하였다.

하지만 현재까지의 모니터링 사례들을 보면 국내에서는 전무하고 해외에서 진행된 사례만 있을 뿐 아니라 그 내용 역시 미흡하다. 또한 이들 연구들의 대부분은 계측을 중점적으로 다루고 있으며, 건전성 평가 역시 단순한 재료적 특성의 기준에 준하고 있다. 따라서 본 연구에서는 수치해석 데이터를 이용하여 손상 탐지 및 위치 추정이 가능한 기법에 대한 연구를 수행하였다.

1.4 연구 범위와 내용

본 논문에서는 생산 라이저의 건전성 평가를 위해서 주요 파손 부위와 모니터링 사례를 분석하였다. 또한 기존 구조물에 적용되었던 손상탐지 기법을 분류 및 검토를 하고 간단한 라이저 수치해석 모델에 적용 하여 적절한 기법을 선정하였다. 선정한 기법을 실제 라이저 모니터링 시스템에 적용하기 위해서는 센서 개수에 대한 제한이 있기 때문에 센서 개수 선정은 매우 중요하다. 그러므로 선정된 기법을 수치해석 모델에 적용하고 센서별 손상탐지 결과를 바탕으로 적절한 센서 개수를 선정하였다.

본 논문의 목적을 달성하기 위하여 Fig. 3과 같은 체계를 통해 수행을 하였다.

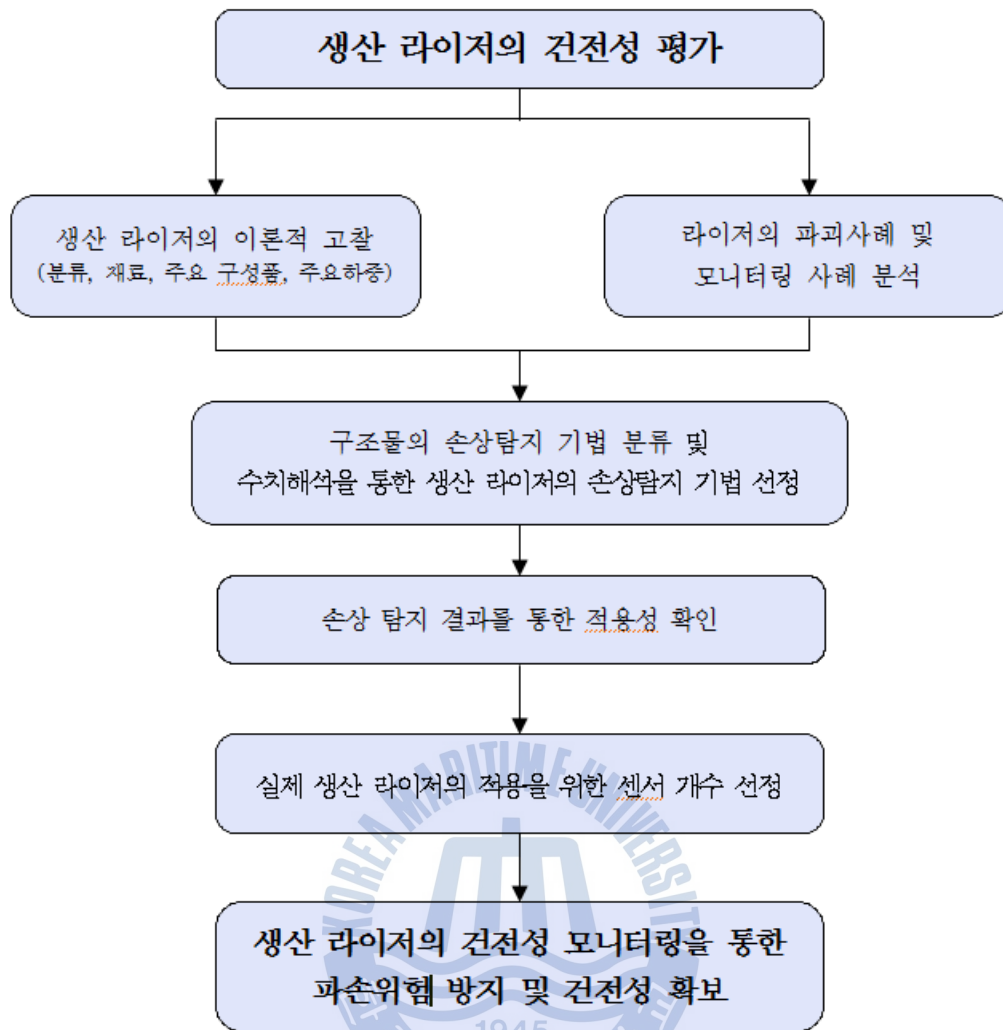


Fig 3. 연구 수행 체계

본 논문의 순서는 다음과 같다.

제 1 장에서는 생산 라이저 건전성 평가를 위하여 연구 배경과 국내외 연구 동향 및 본 논문의 연구 방향을 제시하였다.

제 2 장에서는 수치해석을 수행하기에 앞서 모델 선정 및 하중적용을 위해 생산 라이저 시스템의 분류, 재료 및 주요 구성품 그리고 작용 하중에 관련하여 기술하였다.

제 3 장에서는 기존 라이저의 파괴 사례 및 종류별 모니터링 사례를 분류 및 검토하였다.

제 4 장에서는 기존 구조물에 적용되던 손상탐지 기법을 분류하고 각 기법을

수치해석 모델에 적용하여 생산 라이저에 적용 가능한 기법을 선정하였다.

제 5 장에서는 선정된 기법을 실제 라이저에 적용하기 위한 과정으로 제한된 센서 수에 따른 손상탐지를 실시하여 적절한 센서 개수를 선정하였다.

제 6 장에서는 본 연구를 통해서 얻은 결론 및 차후 연구 과제에 대해서 기술하였다.



제 2 장 해양 생산 라이저 시스템

2.1 개요

Fig. 4와 같이 해양 생산 플랫폼 시스템은 다양한 방식으로 사용되고 있으며, 심해의 경우 Tension Leg Platform(TLP), Spar, Semi-submersible, Floating Production Storage and Offloading(FPSO)와 같은 부유식 플랫폼에 라이저를 연결하여 해저자원을 채취하게 된다. 라이저 시스템은 해수면의 상부 구조물과 해저판 또는 Wellhead를 연결하도록 구성되어 있으며 유체의 이송, 전기적 연결, 수압의 조절 등의 목적으로 사용된다. 라이저는 사용 용도에 따라 시추 라이저(Drilling Riser)와 생산 라이저(Production Riser)로 구분할 수 있으며 본 논문에서는 생산 라이저에 관해서만 기술하였다. Det Norske Veritas (DNV) (2001)는 생산 라이저 시스템을 상부 플랫폼의 움직임에 따라 Top Tensioned Riser, Compliant Riser, Steel Catenary Riser로 분류하고 있다.

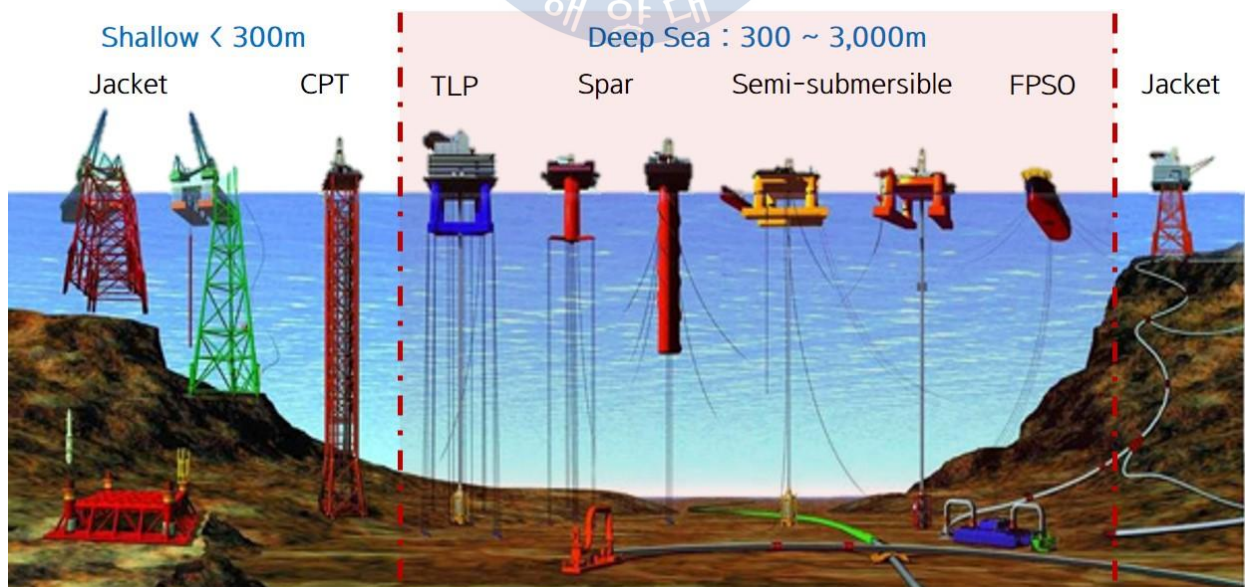


Fig. 4 해양 생산 플랫폼 시스템

2.2 해양 생산 라이저의 분류

2.2.1 Top Tensioned Riser

Top Tensioned Riser는 라이저의 수직 이동을 감소시키기 위한 목적으로 상부에 인장력을 도입하여 상부 플랫폼에 지지되는 시스템이다. 플랫폼의 수평 움직임에 의해 발생된 응력은 라이저의 Stress joint와 Keel joint로 유도하여 분배시킨다.

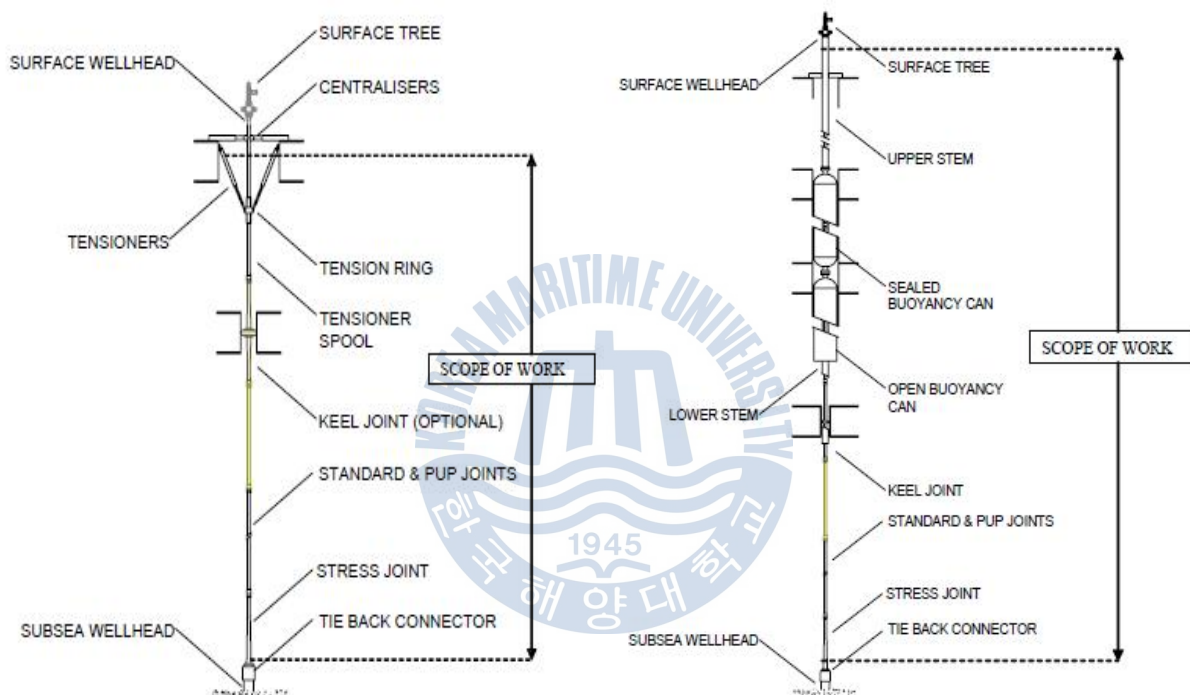


Fig. 5 Top Tensioned Riser

Top Tensioned Riser는 자켓 구조물과 같은 고정식 해양구조물 또는 TLP, Spar, Semi-submersible 등 상하 움직임이 작은 플랫폼에서 사용한다. Fig. 5와 같이 Top Tensioned Riser의 상부 인장력 시스템은 부력 모듈(Buoyancy module)과 유공압 텐서너(Hydro-pneumatic tensioner)로 부여되는 형태로 구분할 수 있다. Semi-submersible에서는 상부의 인장력 도입을 위해 주로 부력 모듈을 사용된다. 하지만 TLP, Spar에서는 부력 모듈의 설치가 복잡하고 비용이 많이 들기 때문에 사용이 용이하고 설치 시간이 적게 소요되는 유공압 텐서너를 적용하여 사용된다.

수심이 깊어질수록 Top Tensioned Riser 상부의 인장력은 라이저의 무게를 지지하고 하부 압축을 방지하기 위해서 더욱 증가하게 된다. 라이저의 인장력이 증가하게 되면 라이저 장력 시스템과 부력 모듈의 성능뿐 아니라 Keel joint 나 Stress joint의 성능도 향상 되어야 한다. 또한 열악한 환경에서는 플랫폼과 라이저 자체에 큰 움직임을 주게 된다. 따라서 수심이 깊고 열악한 환경에서 TTR은 기술적 실현성이 낮고 비경제적이다(Halil, 2012).

2.2.2 Compliant Riser

Compliant Riser는 플랫폼의 heave 운동에 대처할 수 있도록 유연하게 설계된 시스템이다. Compliant Riser의 구성은 heave 운동의 보정 시스템 같은 추가 장치 없이 플랫폼의 상하 운동을 흡수할 수 있도록 높은 동적저항 및 유연성을 갖기 때문에 깊은 수심과 열악한 환경에서 유용하게 사용할 수 있어 일반적으로 TLP, Semi-submersible, FPSO 등의 부유식 플랫폼에 사용된다.

Compliant Riser는 상부 연결부 및 Hang-off 위치, 계류방식, 환경 조건, 플랫폼의 거동 특성 등과 같은 요인들을 고려하여야 한다. Bai & Bai(2005)는 Compliant Riser를 Fig. 6과 같이 Free Hanging Catenary, Lazy Wave, Steep Wave, Lazy-S, Steep-S, Pliant Wave 등 총 6가지로 분류하였다.

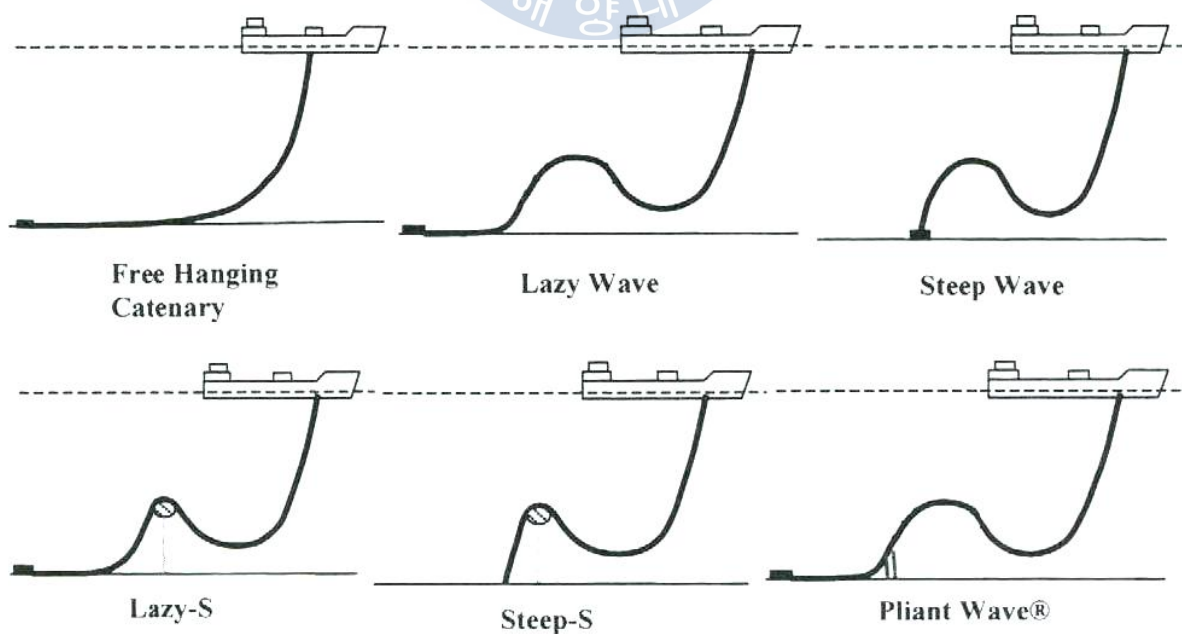


Fig. 6 Compliant Riser 분류

(1) Free Hanging Catenary

Free Hanging Catenary 라이저는 심해역에 사용되는 방식이고, 라이저가 플랫폼과 함께 상하 이동하면 단순히 같이 떠오르며 해저에서 당겨지기 때문에 다른 거동 보정 장치가 필요 없다. 심해에서의 상부 인장력은 길이가 긴 라이저의 무게를 지탱하여 매우 크기 때문에 라이저의 상단부에 클램프를 부착함으로써 부력 모듈의 크기를 줄일 수 있다. 하지만 상부 플랫폼의 거동은 Touch Down Point로 직접 전해지게 되어 과도한 구부러짐이나 압축이 발생하여 손상이 일어날 수 있다. 특히 heave 운동에서 손상 가능성이 크다.

(2) Lazy Wave와 Steep Wave

Lazy Wave와 Steep Wave 라이저의 경우에는 부력 모듈을 라이저의 길이에 따라 추가하여 라이저와 상부 플랫폼의 움직임을 Touch Down Point에서 분리시키는 시스템이다. 이 시스템은 해저 기초 구조가 필요하기 때문에 심해역에서는 Steep Wave보다는 Lazy Wave 시스템이 더욱 적합하다. 반면에 Lazy Wave 시스템은 파이프에 해저 생물의 부착 등에 의한 자중의 변화에 따라 시스템의 구성 변화가 일어나기 쉽지만 Steep Wave 시스템은 자중의 변화에도 시스템 구성을 유지할 수 있다.

(3) Lazy-S와 Steep-S

Lazy-S와 Steep-S 라이저는 Touch Down Point의 구조적 문제점을 해결하기 위하여 해저 구조물에 고정된 고정 부표 또는 부력 부표를 추가하여 보완한 시스템이다. 플랫폼의 거동에 의한 라이저의 인장력의 변화를 해저의 부력 부표를 통해 흡수하여 Touch Down Point에서 응력을 거의 받지 않도록 하는 시스템이다. 하지만 대형 선박의 경우 Lazy-S 시스템은 Touch Down Point에서 압축력 문제가 발생하기 때문에 이 경우에는 Steep-S 시스템을 사용한다. 'S' 시스템은 복잡한 설치 절차 때문에 앞서 기술한 Catenary나 Wave 시스템의 적용이 어려운 경우에 주로 고려된다.

(4) Pliant Wave

Pliant Wave 라이저 시스템은 상부의 인장력이 Touch Down Point로 전달되지 않고 해저의 앵커로 전달되도록 유도하여 제어하는 시스템이다. 이 시스템

은 높은 응력을 받지 않고 특별한 구성의 변화 없이 플랫폼의 거동과 자중의 한계 범위를 수용할 수 있다. 그러나 복잡한 설치 절차 때문에 Catenary나 Wave, 'S' 시스템을 사용하지 못하는 경우에만 사용된다.

2.2.3 Steel Catenary Riser

초심해역에서는 높은 외부 압력, 비용, 낮은 온도 등 때문에 기존의 라이저 시스템의 사용이 불가능하였지만, 강관의 경우 높은 강성을 갖고 있어 외부 압력에 견딜 수 있으며 기존 라이저에 사용되는 재료에 비해 비용이 낮고 온도 제한이 없어서 적용이 용이하다(SBM Atlanta, 2011).

Steel Catenary Riser는 Compliant Riser와 달리 부력 부표가 필요하지 않기 때문에 더욱 길이가 긴 라이저 시스템에 사용할 수 있다. 또한 강재가 유연재보다 저렴하기 때문에 수심에 따른 비용의 증가폭이 적어지게 되었고, 해저에는 라이저 베이스, Stress joint, Flex joint 등의 필요 개소가 감소하게 되어 초심해역에도 비용과 성능의 불균형 없이 적용할 수 있다. 따라서 Steel Catenary Riser는 초심해역에 적합하며 구성은 Fig. 7과 같다.

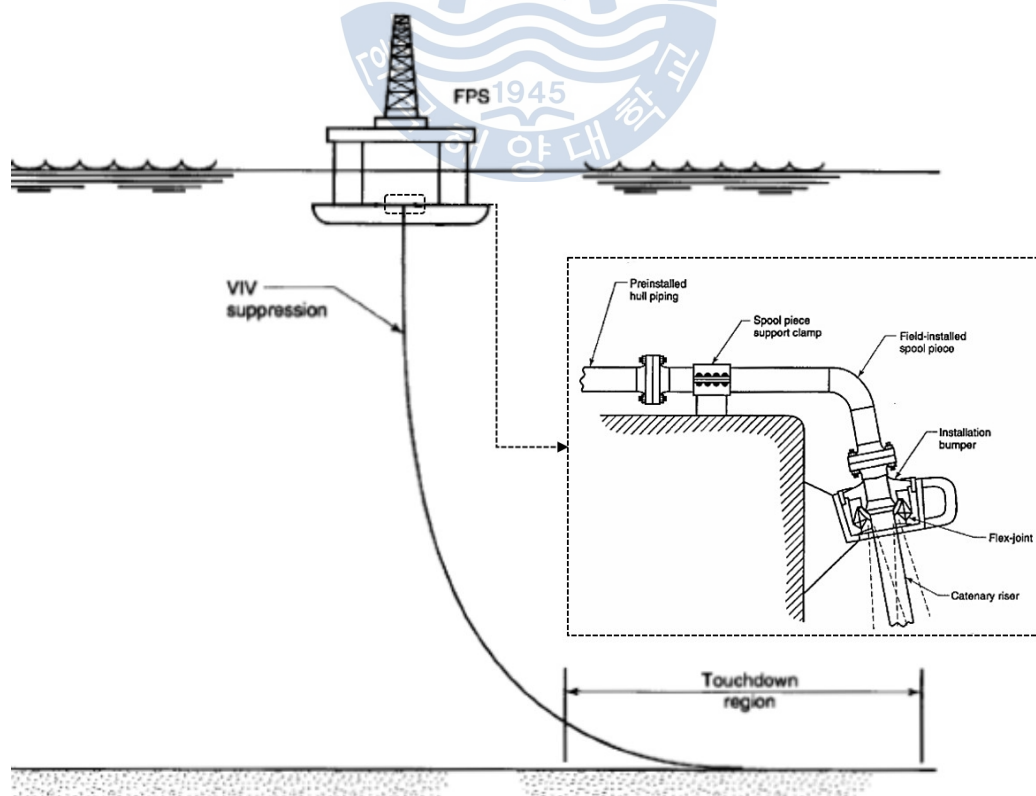


Fig. 7 Steel Catenary Riser

그러나 Steel Catenary Riser는 환경 하중에 대해서 매우 민감하다. 열악한 환경에서는 플랫폼의 heave와 surge 운동에 따라 양 지지단 사이의 라이저 길이가 변화하게 되면 길이에 따른 상하 최대 곡률점이 이동하게 되어 Touch Down Point가 이동하게 된다. 그 결과 라이저의 좌굴 및 피로 손상이 유발된다. 또한 라이저와 심해의 해류의 진동에 의한 VIV(Vortex Induced Vibration) 역시 라이저의 피로 손상에 큰 영향을 준다.

2.3 라이저의 재료(Material)

라이저 시스템의 재료는 내부 유체, 외부 환경, 하중, 최대·최소 온도, 수명, 운영기간, 대표 파괴 모드 등에 의해 선정된다. 라이저의 재료는 일반적으로 강관 파이프(Metallic Pipe)와 유연 파이프(Flexible Pipe)로 구분할 수 있다.

강관 파이프는 주로 평균 수심에 적용되고 있으며, 부력 모듈이 부착된 강관 파이프는 심해에 적용할 수 있는 방법 중 하나이다. 초심해역에 적용하는 경우에는 상부 허용 응력을 확보하기 위하여 티타늄(Titanium) 복합 파이프가 사용된다.

일반적으로 수심이 낮은 연안 해역에서 유연 시스템이 필요한 경우에는 유연관을 사용하지만 심해역의 Compliant Riser 경우에는 주로 강관 파이프를 사용한다.

2.3.1 강관 파이프(Metallic Pipe)

라이저는 일반적으로 저탄소 강관을 사용하며, 알루미늄이나 티타늄 합금 같은 재료들이 심해에 사용된다. 재료 등급은 X60, X65, X70 등으로 나뉜다.

초심해의 경우 저온·고압 등의 열악한 환경 때문에 티타늄 합금이 주로 사용된다. 티타늄 합금은 강관에 비해서 절반정도 낮은 탄성계수를 갖고 있기 때문에 심해 환경에 적용할 수 있는 유연성을 확보하고 있지만, 항복 응력과 중량은 강관에 비해 낮다.

2.3.2 유연 파이프(Flexible Pipe)

유연 파이프는 복합재료 층 구조에 의해 낮은 굽힘 강성과 높은 축 인장 강

성을 갖는 파이프이다. 기본적으로 유연 파이프는 나선형 아머로 구성된 비결합(Unbonded) 파이프와 폴리머 실링 층으로 구성된 결합(bonded) 파이프로 분류할 수 있다.

비결합 파이프는 일반적으로 파괴 저항층, 압출 성형된 폴리머 유체 배리어 층, 탄소강으로 구성된 내부 압력 저항층, 축강성 증가를 위해 탄소강선으로 나선형으로 감겨 형성한 인장층, 압출성형된 외부 방수 피복층 등으로 구성된다.

결합 파이프는 일반적으로 탄성 중합체의 여러 계층을 래핑 또는 각각 압출 성형하여 접착제를 사용하여 부착하거나, 열 또는 압력에 의해 결합시켜 사용한다. Fig. 8은 비결합 유연 파이프의 구조를, Fig. 9에는 결합 유연 파이프의 구조를 나타내고 있다.

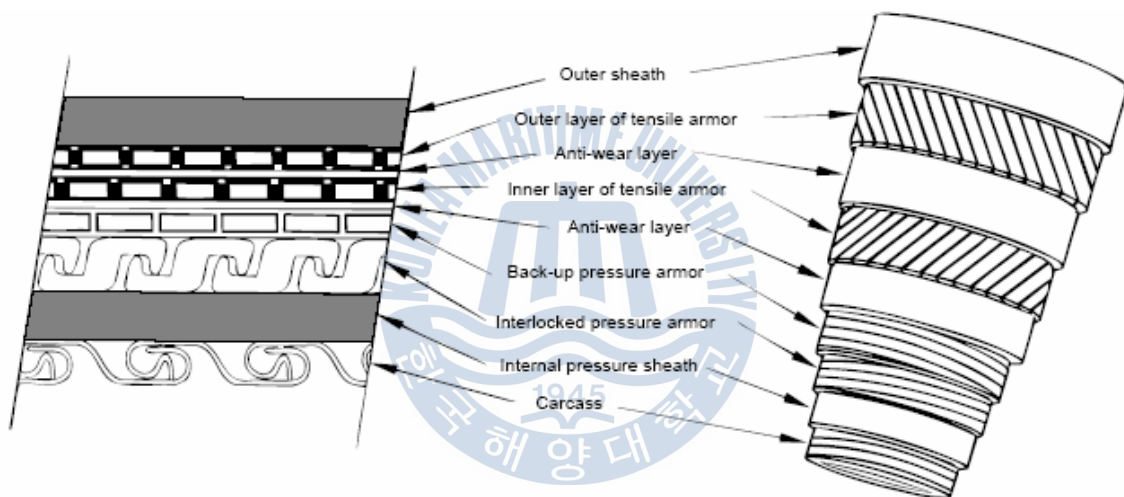


Fig. 8 비결합 유연 파이프 구조

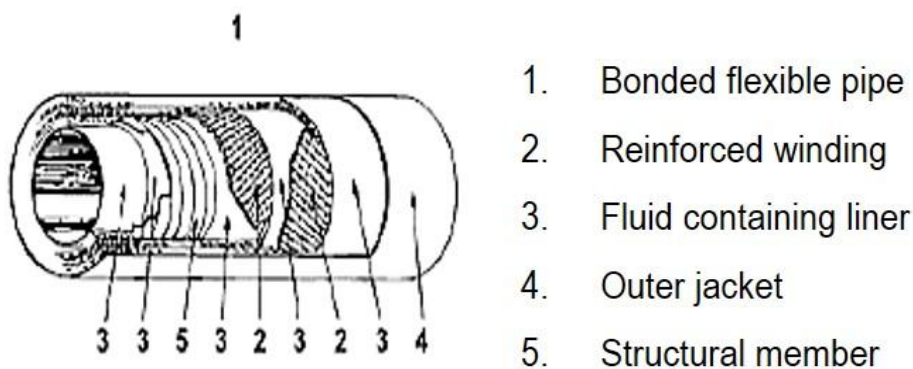


Fig. 9 결합 유연 파이프 구조

2.4 라이저의 주요 구성품

라이저 시스템의 각 구성 요소들은 높은 인장력과 굽힘 모멘트에 견디며 피로에 저항하기 위하여 충분한 유연성을 가져야 한다. 또한 인장력 및 플랫폼의 요건을 최소화하기 위해서 가능한 중량이 가벼워야 한다. 라이저의 주요 구성 요소는 Flex joint, Ball joint, Bend Stiffeners, Bending Restrictor, Tapered Stress joint 등이 있으며 용도 및 기능을 간략히 기술하면 다음과 같다.

2.4.1 Flex joint

Flex joint는 라이저의 상·하부 구역의 굽힘 모멘트를 최소화하는데 사용된다. 강재와 탄성 재료의 층이 교대로 구성된 Flex joint는 상부 연결부에서 회전운동에 의한 변형을 제어하는 역할을 한다(American Petroleum Institute (API), 1998). 심해 라이저 시스템에서 Flex joint는 상단의 높은 인장력 및 이에 대한 피로 범위를 고려해야 한다. Fig. 10은 Flex joint의 구조와 플랫폼에 설치된 모습이다.

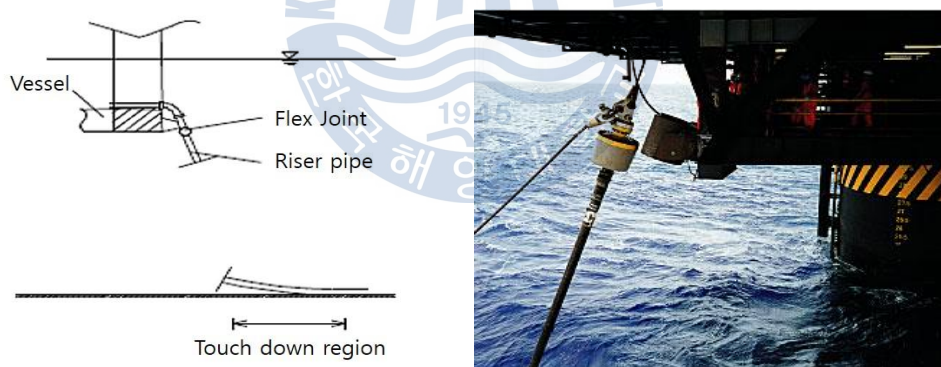


Fig. 10 Flex joint의 구조 및 설치 모습

2.4.2 Ball joint

Ball joint는 두 파이프 부재를 연결하는 부분에 소켓 하우징과 일치시키는 볼로 구성되어 있다. 볼과 소켓 사이에 있는 슬라이딩 실(Sliding Seal)은 유체 유동을 유지시킨다. 또한 상부 플랫폼에 의해 발생하는 상하·좌우 운동과 그 외에 환경 하중에 의해 발생하는 전단력, 인장력, 최소 굽힘 모멘트 등의 하중은

Ball joint를 통해 전달되게 되며, 라이저 요소의 상대적인 각 회전 운동에 유연성을 주게 된다(Bai & Bai, 2005).

2.4.3 Bend Stiffener

Bend Stiffener는 허용 굽힘 모멘트 이상의 모멘트를 받는 국부적 위치에서 굽힘 모멘트를 분배하기 위해 사용된다. Bend Stiffener를 부착함으로써 라이저의 국부 강성이 증가하여 변형을 및 곡률이 감소하게 된다. Bend Stiffener는 일반적으로 Steel Catenary Riser의 상단에 사용되며, 낮은 굽힘 강성을 갖는 유연관과 강성이 매우 큰 금속 단부 접합부 사이에 연속적으로 하중을 분배하는 역할에도 사용된다. Bend Stiffener는 파이프 주위에 성형 폴리머 재료로 덮어서 단부 이음부에 부착되기도 한다. Fig. 11은 Bend Stiffener의 구성이다.

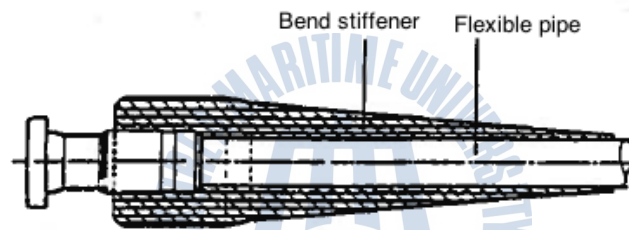


Fig. 11 Bend Stiffener

2.4.4 Bending Restrictor

Bending Restrictor는 허용 굽힘 응력 이상의 응력을 받아 라이저 구조에 손상의 우려가 있는 부위의 유연관을 보호하는데 사용된다. 일반적으로 특정 굽힘 한계에 도달할 때까지 배관에 영향이 없도록 파이프 주위를 풀어놓았다가 굽힘 반경이 넘는 시점에서 Half ring에 의해 닫혀져 라이저를 안전성을 유지하는 안전장치이며, Wellhead, J-튜브 출구, 유연 파이프와 강성 파이프와 연결점에 주로 사용된다.

2.4.5 Tapered Stress joint

Tapered Stress joint는 Fig. 12와 같이 플랫폼과 라이저 사이에서 응력 전달 부재로 주로 사용되며, 국부 굽힘 응력을 감소시키고 라이저 단부에 유연성을

제공하기 위해 사용되는 부재이다.

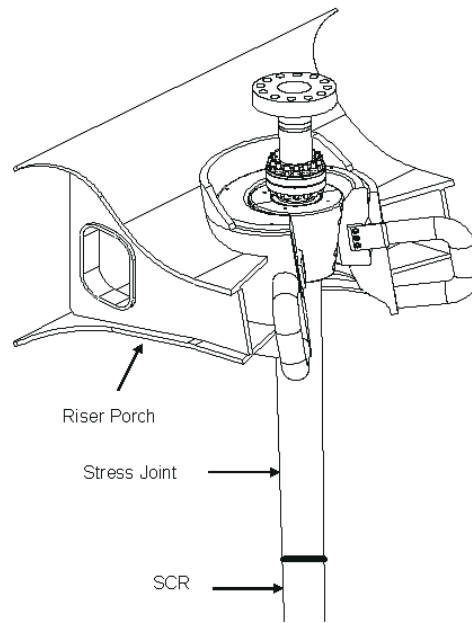


Fig. 12 Tapered Stress joint

2.5 라이저의 주요 하중

라이저 시스템의 구조 설계에서 상부 플랫폼의 거동 파악이나 환경 하중등의 하중을 파악하는 것은 중요한 요소이다. API(1998)와 DnV(2001)에서는 일반 하중 및 압력 하중, 환경 하중, 사고 하중 등을 라이저의 주요 하중으로 분류하고 있다.

일반 하중과 압력하중은 환경 또는 우발적 효과를 고려하지 않고 사용되는 시스템 자체의 하중을 말한다. 환경 하중은 해양 환경에 의해 직접·간접적으로 적용되는 하중을 말하며, 사고 하중은 계획되지 않은 사건에 의해 발생하는 하중이다.

2.5.1 일반 하중 및 압력 하중

일반하중 및 압력하중은 라이저의 자중, 수면하의 부력, 밀도, 피복, 내부 압력 및 수압에 의한 외부 압력, 공칭 상부 인장력, 부력, 플랫폼의 제한, 해양생물의 무게 등이 주요 고려사항이다. 일반 하중은 운송, 보관, 설치, 테스트 등 일반적인 운영 중 발생하는 고정하중, 활하중, 변형하중에 의해 정의되며, 압력

하중은 내·외부 수압의 효과에 의한 하중이다.

고정 하중은 공기 중 기본 구조물(라이저, 코팅, 부식 등)의 무게에 의한 하중, 고정/부착된 부재, 수심에 따른 부력들에 의한 하중, 해양생물의 부착에 의한 자중을 말한다. 해양생물의 부착에 의한 자중의 증가는 조수의 변화에 따라 달라지며 주로 수심 80m 이전의 평균 수위 근처에서 크게 작용한다.

활하중은 따로 분류한 환경 하중을 제외하고 운영 상태에 따라 변경될 수 있으며, 일반적으로 유동, 무게, 압력, 온도에 대한 하중을 말한다.

변형 하중은 파이프 라인과 라이저의 reel, stringer, 해저 지형 등의 경계조건에 의해 변형에 의해 적용된다.

2.5.2 환경 하중

환경 하중은 해양 환경 현상에 의해 직접적, 간접적으로 적용되는 하중으로 파랑 하중, 해류 하중, 플랫폼의 거동, 지진 하중, 빙설 하중, 풍하중 등으로 분류된다. 이 중 라이저에 가장 영향이 큰 파랑 하중은 파고와 파랑 주기가 불규칙적인 동적 하중으로 구분되며, 해류는 수심에 따라 속도가 일정하기 때문에 정적하중으로 작용하게 된다. 또한 해류나 파랑과 같이 흐름 방향(in-line)으로 작용하는 힘 외에도 부가적으로 와동방출(Vortex Shedding)이 발생하게 된다.

(1) 동유체력 산정

파랑 하중과 같은 유체력을 산정하는 방법은 모리슨(Morison) 방정식, 회절(Diffraction) 이론, Froude-Krylov 이론 등으로 크게 3가지로 나눌 수 있으며 (Chakrabarti, 1987), 이 중 해양 생산 라이저와 같은 세장형 구조물이 심해에 설치되는 경우에는 구조물의 직경이 파장에 비해 충분히 작다고 가정하는 모리슨 방정식을 사용하여 유체력을 산정하게 되며, 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{2} \rho_w C_D d (u - \dot{x}) |u - \dot{x}| + \rho_w C_I A (a_x - \ddot{x}) + \rho_w A \ddot{x} \\ &= \frac{1}{2} \rho_w C_D d (u - \dot{x}) |u - \dot{x}| + \rho_w C_I A a_x - \rho_w (C_I - 1) A \ddot{x} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, ρ_w 는 해수 밀도, C_D 는 항력 계수, d 는 부재의 외경, u 는 물입자 속도,

\dot{x} 는 부재의 운동속도, C_L 는 관성력 계수, A 는 부재의 투영 단면적, a_x 는 물입자의 가속도, \ddot{x} 는 부재의 운동 가속도이다.

(2) 양력 및 와동방출(Vortex shedding) 산정

와동방출이란 표면의 구배 변화에 의해서 구조물 뒷면에서 와류가 발생하고, 이 와류가 구조물에서 떨어져 나가는 현상을 말한다. 레이놀드수(Reynolds number)가 증가하면 와류는 분리점(separation point) 뒤에서 실린더의 양 측면으로부터 비대칭적으로 떨어져 나가게 되고 이는 흐름 방향에 대하여 실린더 주변에 비대칭적인 압력 분포를 발생시키게 되어 흐름방향에 대해 직각방향의 힘이 발생하게 되는데 이를 양력(Lifting force)라고 한다. 연직한 실린더의 단위 길이 당 작용하는 양력은 식 (2)와 같다.

$$f_L = \frac{1}{2} \rho C_L u^2 \quad (2)$$

여기서, C_L 은 양력계수(Lift Coefficient)이고 u 는 유체 속도이며 d 는 구조물의 외경이다.

그러나 와동방출은 환경 조건의 변화에 따라 직교축에 대하여 불규칙적으로 진동하므로 양력 또한 불규칙적이어서 진동하는 흐름에 대하여 완벽한 이론 해를 얻을 수 없다. 그래서 와동방출의 진동수를 결정하는 Strouhal수를 반주기에 대하여 일정하다고 가정하고 나면 식 (3)에 의해 와동방출의 진동수(f_s)를 구할 수 있다.

$$f_s = \frac{Su}{d} \quad (3)$$

여기서, f_s 는 와동 방출의 주파수이고, S 는 Strouhal수이다. 이러한 와동 방출에 의한 구조물의 진동을 와동 유기 진동(Vortex Induced Vibration, VIV)라고 하며, 해양 라이저의 설계에 있어서 중요한 고려 사항이다. 또한 양력은 항력에 비하여 크기는 작으나 반복 하중을 일으켜 라이저의 피로파괴 가능성이 높아지기 때문에 반드시 고려해야 하는 사항 중 하나이다.

(3) 플랫폼의 거동 산정

플랫폼의 거동에 따른 라이저의 움직임은 Semi-submersible, TLP, Spar, FPSO 등 플랫폼의 종류에 따라 다르며, 플랫폼의 변위 증가는 라이저의 굽힘 응력을 증가시키기 때문에 중요한 사항 중 하나이다. 플랫폼의 수평 이동, 파동에 따른 수평·수직 운동, 불규칙 표면과 간의 상호 작용 중 주파수 차이에 의해 발생하는 장주기 운동 등을 고려하여야 한다.

2.5.3 사고 하중

사고 하중(Accidental Load)은 극심한 해양 환경에서 라이저의 작동 오류나 조작 미숙 등에 의해 발생하는 계획되지 않은 하중을 말한다. 일반적으로 사고 하중은 중간 저장 장치의 유지 능력 부분 상실, 텐서너의 파손, 화재 및 폭파, 선박 충돌, 부재의 탈락, 라이저 외부 충격에 의한 내부의 유체 누설 등의 원인에 의해 발생한다.



제 3 장 라이저 모니터링 사례 분류

제 3 장에서는 생산 라이저의 파손 사례를 파손 부위별로 분류하였고, 기존 해외 모니터링 사례를 Top Tensioned Riser와 Steel Catenary Riser로 분류하여 분석하였다.

3.1 라이저의 파손 사례

라이저는 오랜 기간 사용되어져 왔지만 주요 손상 및 파괴 형상에 대한 결론을 도출하기에는 사례가 부족하며 또한 이러한 파손 사례들은 업체에서 비공개하고 있는 실정이다. 현재 공개된 피해 보고서를 중심으로 해외 사례들을 분석한 결과 라이저의 구조가 심각하게 손상된 결과는 없었으나, 장비 작동 중 Flex joint의 파손이나 Tapered Stress joint와 Flexible Riser에서 균열, 피로 파괴 등의 문제가 있었다.

3.1.1 Flex joint 파손

Flex joint의 최초 파손 사례는 2004년 7월에 GOM(Gulf of Mexico)사의 Steel Catenary Riser에서 결함이 생겨 기름이 유출된 사례이다(GOM OCS Region, 2004). 다이버의 육안검사 결과 Flex joint 부분의 파손이 기름 유출 원인으로 파악되었고, 그 후 다른 부위에 이상 여부를 확인하기 위해 작업 중지 후 분리 검사한 결과 5개의 Flex joint의 회전 볼 주변 탄성 쉘 부분에서 Fig. 13과 같이 전과 유사한 손상을 입은 것을 확인하였다. 손상 원인을 파악하기 위하여 Oil States Industries(OSI), 제조업체 및 운영자 팀에 의해 상세한 조사가 시행되었고, 그 원인은 탄성중합체(elastomer)의 피로 수명에 큰 영향을 주는 운영 중 압력 파동에 의해 점진적으로 균열이 성장한 것으로 판명되었다.

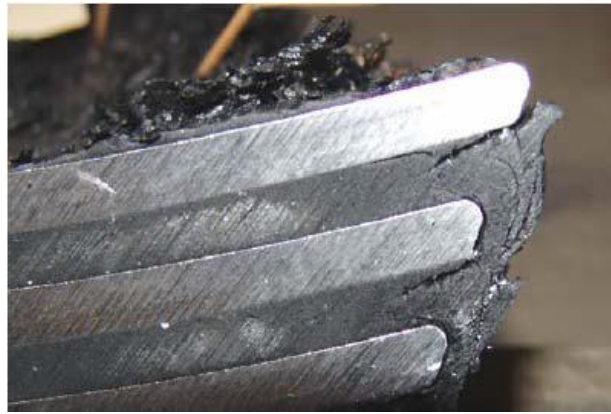


Fig. 13 Flex joint의 피로 균열 파손

이 후 일부의 Flex joint는 Stress joint로 대체되었지만, 일반적으로 Flex joint는 구조 설계 시 페일-세이프(Fail-Safe) 원칙에 따라 설계하기 때문에 주기적으로 검사를 실시하여 사용되고 있다.

3.1.2 Tapered Stress joint 파손

Tapered Stress joint는 Flex joint와 달리 탄성중합체로 구성되어 있지 않기 때문에 탄성 관련 문제가 발생하지 않는다. 하지만 티타늄 재질의 직경 8인치의 Steel Catenary Riser에서 Figs. 14, 15와 같은 두 번의 파손 사례가 있었다. 하나는 하이드로 테스트(Hydro Test) 중 파손되었고 다른 하나는 장비 운영 중 6개월 만에 파손되어 생산 중단되었다. 두 사례 모두 Tapered Stress joint에서 라이저의 연결부를 조작하는 티타늄 플랜지 상부에서 파손되었다(Mansour, et al., 2007).



Fig. 14 Tapered Stress joint의 상부 플랜지 가스 유출



Fig. 15 Tapered Stress joint의 상부 플랜지 목 부분의 균열

파손된 플랜지는 하이드로 테스트 중 과도한 굽힘 하중을 받아 상부 플랜지 아래부터 S-lay 설치 위치까지 균열이 발생하였다. 이는 플랜지의 구조 설계 시 과도하게 간소화하여 설계하였기 때문에 허용 굽힘 하중 이상을 받게 되어 균열이 발생한 것으로 판명되었다. 이러한 파손들에 의해 Tapered Stress joint를 보강하는 방법이 개발되었으며, 그 중 하나는 강재 Half Shell을 양쪽에 볼트로 체결하여 구성하는 방법으로 설치 중에 발생하는 하중을 분배하여 응력 집중현상을 방지하는 역할을 한다.

3.1.3 Flexible Riser 파손

브라질 연안의 Flexible 라이저의 파손 사례를 보면, 플랫폼으로부터 라이저로 연결되는 연결부에서 주로 발견되었고, 특히 끝단의 I-tube 부분에 외부 피복 손상, 부식, Tensile Armour 피로 손상 등에 집중되었다(Marinho, et al., 2007). 이는 수심이 깊어질수록 라이저의 응력이 더욱 커지고 끝단에 집중되어 점차적으로 피로 손상을 주기 때문이다.

일반적으로 Tensile Armour의 와이어에 의해 축방향 응력에 저항하도록 설계되었으나, 운영 중 발생하는 응력에 의해 피로 손상이 가게 되고 Fig. 16과 같은 비틀림 형상을 보이게 된다. Fig. 17과 같은 Tensile Armour의 와이어의 손상은 라이저 및 연결 단부 구조의 안전성을 판단하는데 중요한 기준이며, Flexible 라이저의 상부에서 주로 발견되는 파손 매카니즘이다.

Fig. 18과 같은 I-tube에서의 외부 피복 마모 손상은 라이저의 보강을 위해

내부에 삽입되는 Bend Stiffener와 Tensile Armour 사이의 마찰에 의해 피로가 누적되어 손상이 생긴다.

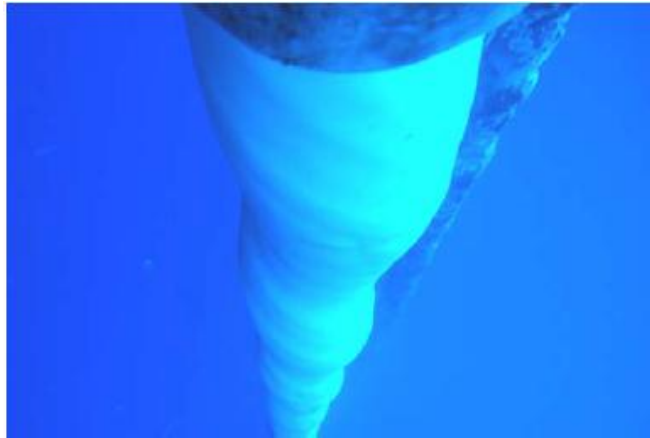


Fig. 16 Tensile Armour의 파손에 의한 비틀림 형상



Fig. 17 Tensile Armour의 단부 와이어 파손



Fig. 18 I-tube의 외부 피복 손상

3.2 생산 라이저의 모니터링 사례

생산 라이저는 Top Tensioned Riser, Compliant Riser, Steel Catenary Riser로 나뉘지만, 본 논문에서는 통상적으로 사용되는 Top Tensioned Riser와 Steel Catenary Riser의 사례만 다루었으며, 각 라이저의 주요 모니터링 섹션별 분류하여 측정 센서 종류 및 배치에 관하여 기술하였다.

3.2.1 Top Tensioned Riser 사례

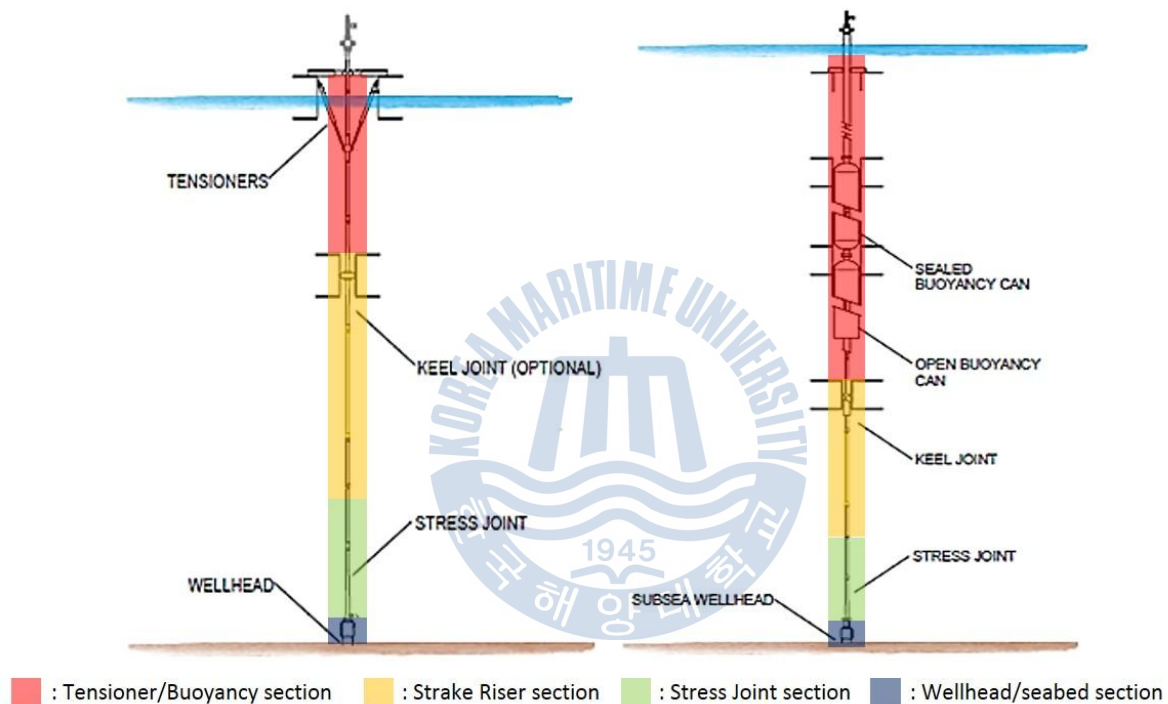


Fig. 19 Top Tensioned Riser의 주요 섹션

Top Tensioned Riser는 유공압 텐서너와 부력 모듈을 사용하여 상부 인장력을 부여하는 형태로 구분할 수 있으며, 각 형태별 주요 섹션은 Fig. 19와 같이 구분하였다. 주요 섹션은 상부 인장력을 부여하기 위한 Tensioner 섹션, 라이저의 VIV 효과 억제를 위해 Strake를 부착한 Strake 라이저 섹션, 응력과 모멘트를 많이 받는 라이저 하단의 Stress joint 섹션, 해저의 자원 채취하여 상부로 압송하기 위한 Wellhead/Seabed 섹션으로 구분하였다.

초기 Top Tensioned Riser의 모니터링 사례는 수심 1300m 노르웨이 해역에

서 Nyk High Semi-submersible Platform의 라이저에서 1997년 5월부터 7월까지 총 74일간 가속도를 계측하였다(Furnes, et al., 1998). 라이저 모니터링을 위하여 2축 수평 가속도계 모듈 5개와 각속도 센서 2개를 Fig. 20과 같이 부착하였다. 라이저의 총길이는 1300m이며 각 측정 지점은 해저면에서 각각 18.5m, 361m, 602m, 900m, 1178m로 약 300m 간격으로 전역적으로 분배 배치하였다. 측정된 가속도 데이터의 처리는 PSD(Power Spectral Density)로 주파수 영역으로 변환하여 수치해석을 통해 예상된 고유진동수 범위내의 고유진동수를 찾았으며, 이를 이용하여 모드형상을 추출하였다.

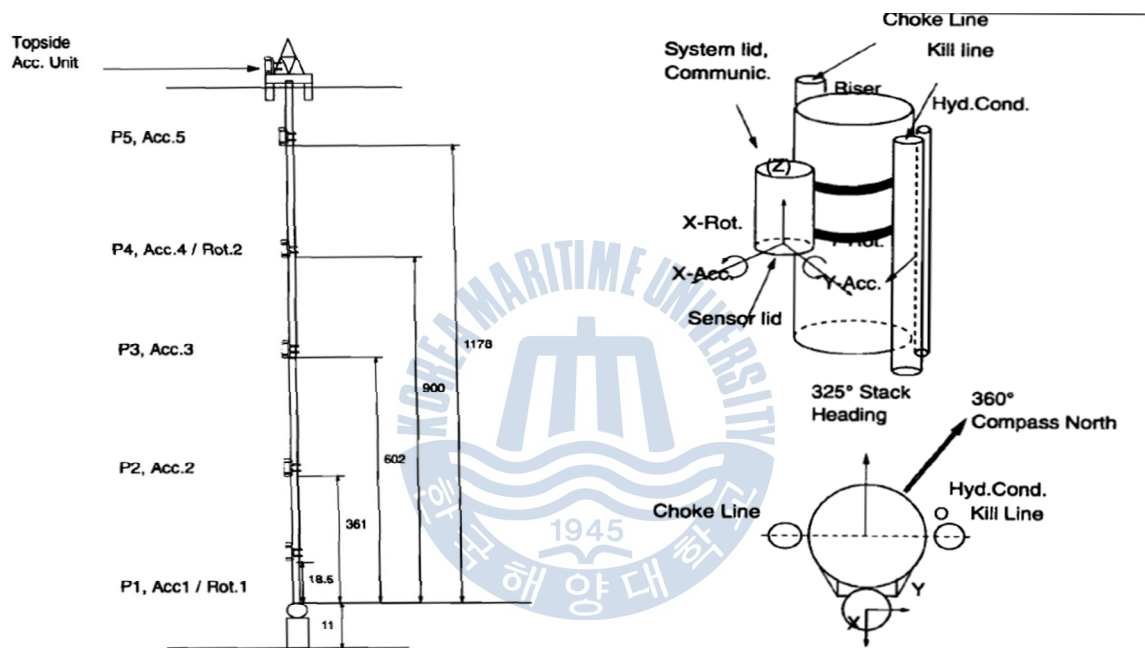


Fig. 20 BP's Nyk High 플랫폼에서 연결된 라이저의 전역적 모니터링 시스템

Kluk, et al.(2013)은 2012년 8월부터 11월까지 3개월간 수심 1,180m~1,939m의 일본 해역에서 JAMSTEC's Chikyū FPSO에 연결된 1,900m 길이의 라이저에서 모니터링을 실시하였다. 측정 지역의 해양 환경은 쿠로시오 해류에 의해 평균 $2\sim 3\text{m/s}$ 속력의 강한 해류의 영향을 받기 때문에 동적 거동을 주요 지표로 지정하여 계측을 실시하였다. 실시간 계측을 위해 Subsea Vibration Data Logger(SVDL)을 개발하였으며, 센서 모듈은 1축 응력계, 2축 수평 가속도계와 2축 수평 각속도 센서를 내장하고 있다. 센서의 배치는 전역적으로 균등하게 각 조인트 부분에 일괄적으로 총 7개의 센서 모듈을 Fig. 21과 같이 joint 부분

에 부착하였으며, 데이터 전송을 위한 케이블은 라이저의 외부의 조인트에 연결되었다. 측정된 가속도 값과 각속도 값은 주파수 영역으로 변환하여 고유진동수와 모드 형상을 추출하였으며, 단축 응력계를 이용하여 라이저의 피로 손상 정도를 계산하였다.

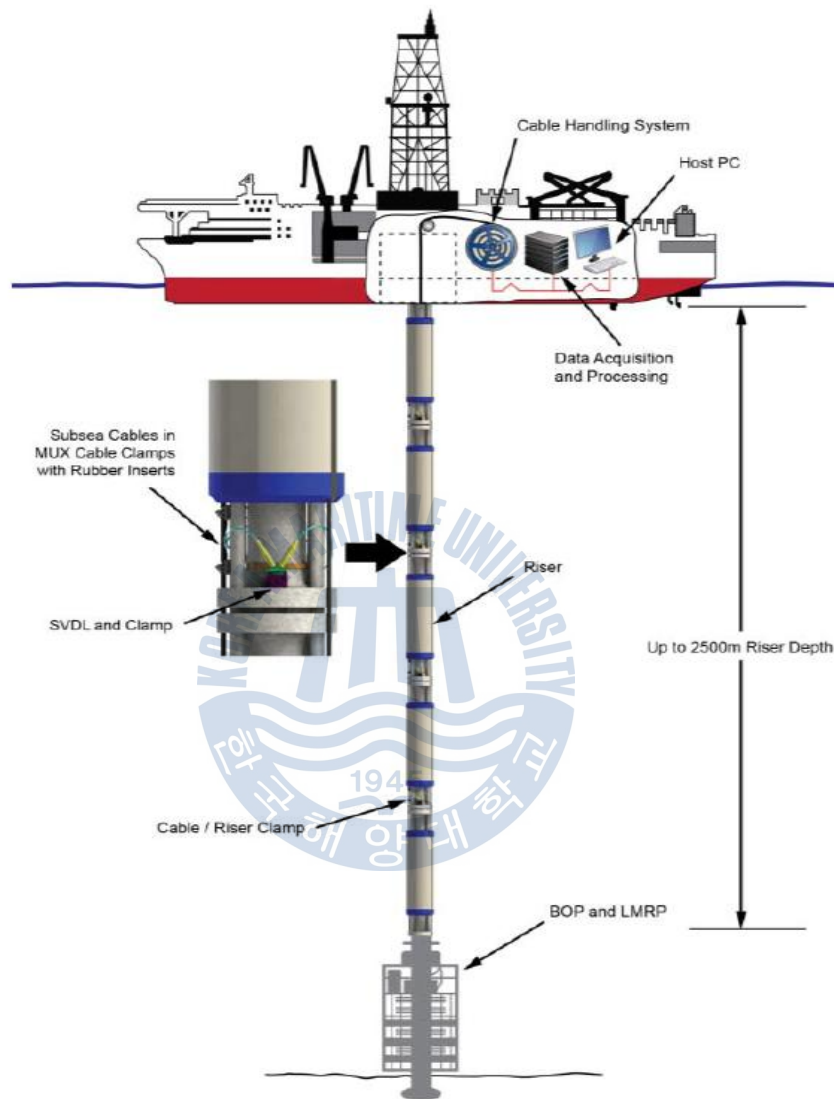


Fig. 21 Chikyu FPSO에 연결된 라이저의 전역적 모니터링 시스템

또 다른 사례로는 2004년 5월부터 약 3년간 멕시코만의 1,310m 수심에 있는 중량 11,500톤의 Marco Polo TLP에서 Top Tensioned Riser에 대해서 모니터링을 실시하였다. 라이저의 Strake에 의한 VIV의 억제 효과를 확인하고 라이저의 안전성을 검사하기 위해 Strake 라이저 섹션에 변형률 센서와 가속도 센서를 부착하여 모니터링을 실시하였다. 또한 상부의 인장력을 측정하기 위하여 변형

를 센서를 부착하여 계측하였다. 이 모니터링 시스템에서는 가속도 값과 상부 인장력 값의 최소, 최대, 평균값을 이용하여 라이저의 안전성을 단순 분석하였다(Joint Industry Project (JIP), 2004).

앞서 설명한 사례를 각 항목별 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1 Top Tensioned Riser의 모니터링 사례 정리

	Furnes, at al.	Kluk, et al.	JIP
플랫폼	Nyk High Semi-submersible	JAMSTEC's Chikyu FPSO	Marco Polo TLP
해역	노르웨이 해역	일본 해역	멕시코만 해역
수심(m)	1,300	1,180~1,939	1,310
라이저 길이(m)	1,300	1,900	1,311
계측 위치	라이저 전반	라이저 전반	Strake 라이저 섹션 Tensioner 섹션
모니터링 센서	가속도 센서 5EA, 각속도 센서 2EA	1축 응력계 2축 가속도 센서 및 2축 각속도 센서 7EA	○ Strake 라이저 섹션 : 가속도 센서 ○ Tensioner 섹션 : 변형률 센서
분석 기법	○ PSD 함수를 이용한 모달 해석	○ 최대 응력 값을 이용한 설계 기준치와 비교 ○ PSD 함수를 이용한 모달 해석 ○ 피로 손상 정도 추출	○ 가속도 값과 인장력 값의 평균값을 이용한 설계 기준치 및 재료 특성 한계 비교

3.2.2 Steel Catenary Riser 사례

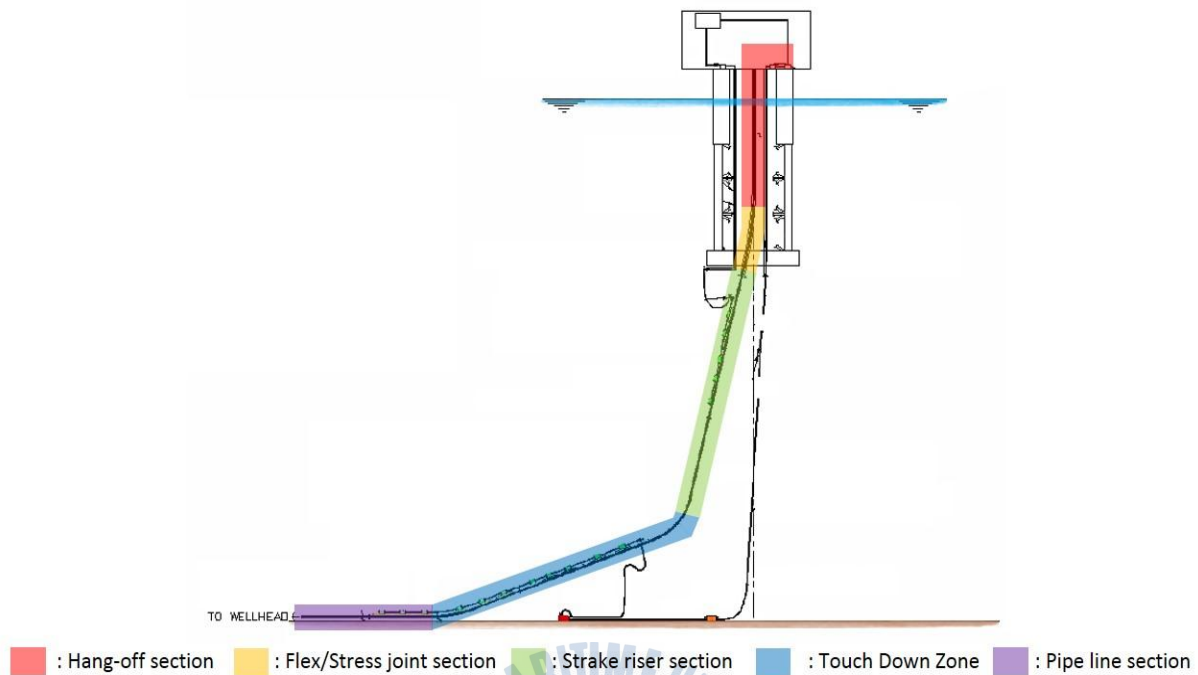


Fig. 22 Steel Catenary Riser의 주요 섹션

Steel Catenary Riser의 모니터링 주요 섹션은 Fig. 22와 같이 채취한 자료를 플랫폼으로 최종 전달되는 Hang-off 섹션, 응력 집중현상을 완화하기 위한 Flex/Stress joint 섹션, VIV 효과 억제를 위한 Strake 라이저 섹션, SCR 구조 설계의 가장 중요하며 취약한 Touch Down Zone 섹션, Wellhead로 이어지는 Pipe line 섹션으로 구분하였다.

Steel Catenary Riser의 최초 모니터링 사례는 1998년 11월부터 브라질 캄포스 분지 말림 해역에서 Touch Down Point부터 해저의 Wellhead까지 Pipe line 섹션에서 수행되었다. 모니터링 센서는 라이저 외부에 4m 간격으로 8개의 스트레인 게이지를 Fig. 23과 같이 배치하여 부착하였다(Roderick, et al., 1999). 측정된 동적 변형률 값을 이용하여 시간 이력 인장력 및 굽힘 모멘트를 계산하였고, 이를 이용하여 PSD함수를 만들어 분석하였다. 또한 응답 값들의 평균, 최대, 최소, Root Mean Square(RMS) 스트레인, 모멘트, 인장력을 기록하였다.

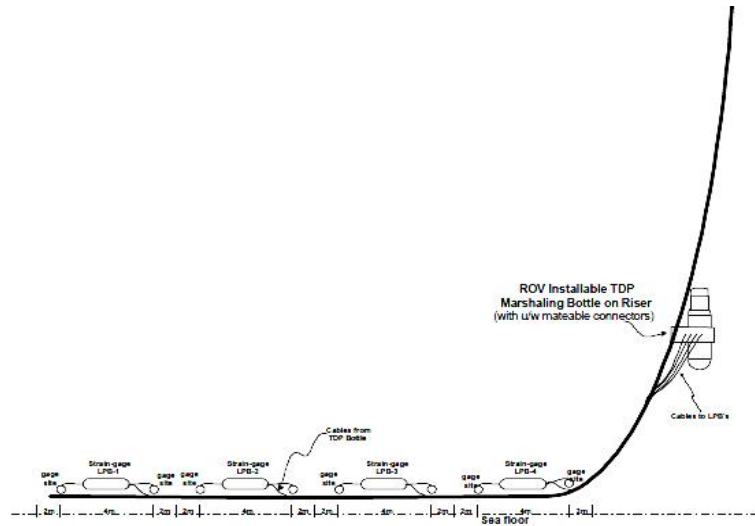


Fig. 23 Petrobras VIII에 연결된 라이저의 Pipe line 섹션의 모니터링 시스템

이후 SCR의 모니터링 사례는 멕시코만의 수심 1,219m 타히티(Tahiti) 해역에서 실시하였다(Karayaka & Ruf, 2009; Karayaka, et al., 2009). 이 모니터링 시스템에서는 Hang-off 섹션, Touch Down Zone, Pipe line 섹션을 주요 구역을 설정하여 Fig. 24와 같이 센서를 배치하여 모니터링을 실시하였다.

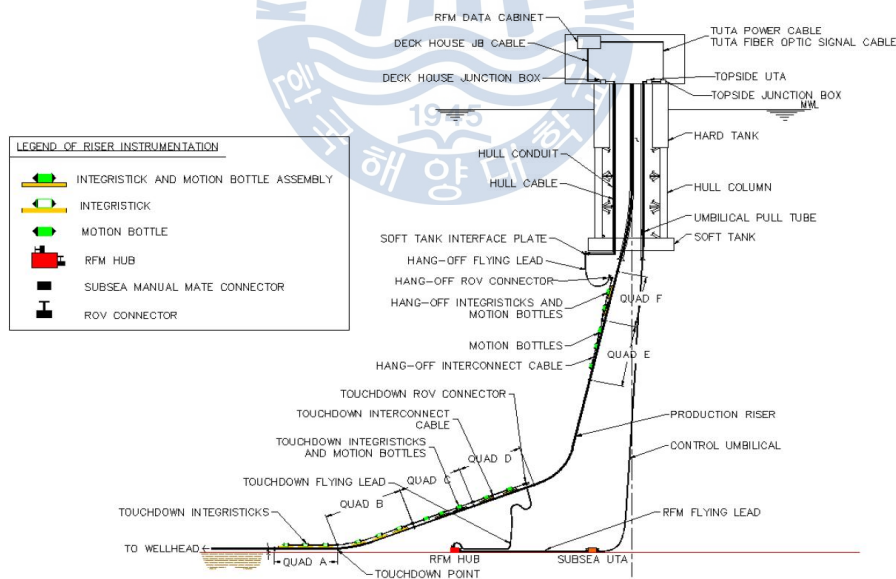


Fig. 24 Hang-off, Touch Down Zone, Pipe line 섹션의 모니터링 시스템

Hang-off 섹션에는 2개의 변형률 센서와 5개의 모션 센서 모듈(3축 가속도 센서, 2축 각속도 센서, 경사계)를 부착하였고, Touch Down Zone에는 각 10개씩의 변형률 센서와 모션 센서 모듈을 부착하였다. Pipe line zone 섹션은 길이

가 길고, 온도에 따른 팽창·수축에 의해 파괴가 될 수 있는 가능성이 크기 때문에 Touch Down Point에서부터 Wellhead까지 200m 간격으로 압력, 온도, 응력 센서를 부착하였다.

Hang-off 섹션 및 Touch Down Zone에서 측정된 동적 응답을 주파수 분석을 실시하여 동적 특성을 추출하고 이를 이용하여 VIV 모니터링을 실시하였다. Pipe line 섹션에서 측정된 압력, 응력, 온도 값과 수치 해석을 사용하여 얻은 값을 비교하여 안전성을 감시하였다.

또 다른 연구로 Douaron, et al.(2009)은 나이지리아 하르코트(Harcourt) 남부에 200km 해역에 있는 Total's Akpo FPSO의 가스 생산 Steel Catenary Riser에서 Flex joint 섹션 및 Touch Down Zone에서 2년간 모니터링을 실시하였다. Fig. 25는 모니터링 시스템의 구조이다.

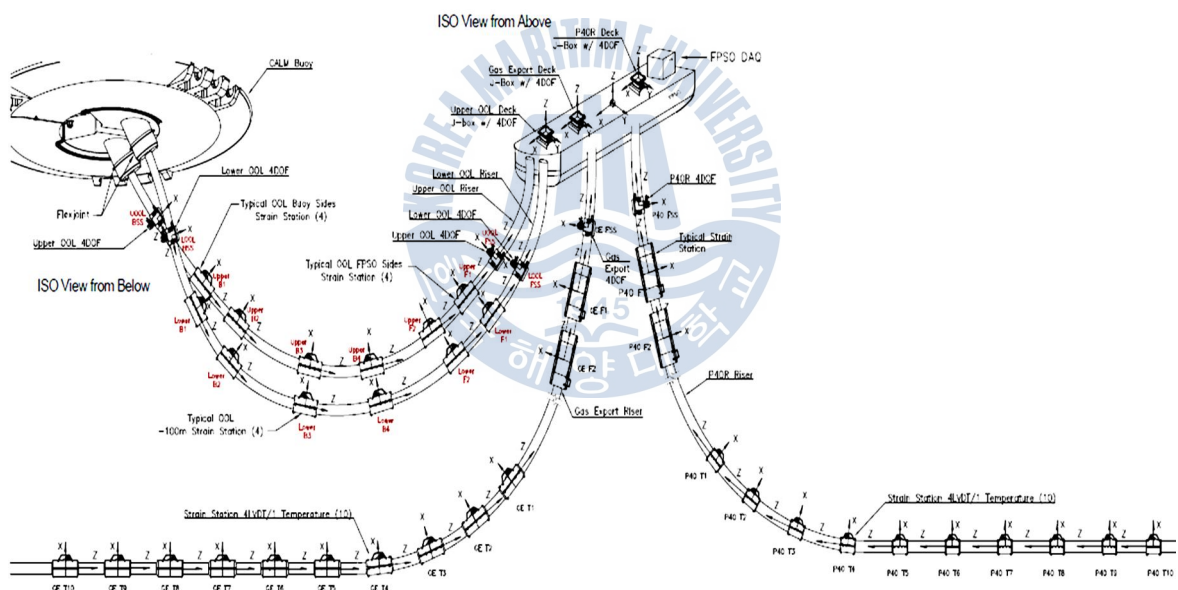


Fig. 25 Total's Akpo FPSO에 연결된 라이저의 Flex joint, Touch Down Zone 섹션의 모니터링 시스템

Flex joint의 주변에 90도 간격으로 클램프로 고정된 4개의 고정밀 변위 센서 (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) 모듈을 Flex joint의 시작점으로부터 20m, 42m, 25m, 45m의 위치에 부착하였다. 또한 계측한 기울기와 수치해석의 최대 기울기를 비교하여 안전성을 확인하였다.

Touch Down Zone에서는 인장력 및 굽힘 모멘트를 계측하기 위해 총 10개의 변형률 센서를 200~220m 간격으로 균등 배치하였다. 측정된 데이터를 사용하여 PSD함수를 만들어 분석하였고, 길이에 따른 모멘트의 분배를 확인하였다.

앞서 설명한 사례를 각 항목별 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2 Steel Catenary Riser의 모니터링 사례 정리

	Roderick, at el.	Karayaka, at al.	Douaron, et al.
플랫폼	Petrobras XVIII	-	Total's Akpo FPSO
해역	브라질 말림 해역	멕시코 타히티 해역	나이지리아 해역
수심(m)	910	1,219	1,250~1,480
계측 위치	Pipe line 섹션	Hang-off 섹션 Touch Down Zone Pipe line 섹션	Flex Joint 섹션 Touch Down Zone
모니터링 센서	변형률 센서 8EA	<ul style="list-style-type: none"> ○ Hang-off 섹션 : 변형률 센서 2EA, 모션 센서 5EA ○ Touch Down Zone : 변형률 센서 10EA, 모션 센서 10EA ○ Pipe line 섹션 : 압력계, 온도계, 응력계 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Flex Joint 섹션 : LVDT 센서 16EA, 경사계 4EA ○ Touch Down Zone : 변형률 센서 10EA
분석 기법	<ul style="list-style-type: none"> ○ 인장력 및 굽힘 모멘트의 PSD 함수 계산 ○ 변형률의 평균, 최대, 최소, RMS 값 산출 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Hang-off Zone, Touch Down Zone : 피로 손상값 추출 ○ Pipe line Zone : 수치 해석 값과 압력, 응력, 온도 응답 값 비교 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Flex Joint 섹션 : 정적 변형률을 이용한 joint 재료 안전성 확인, 수치해석과 비교 ○ Touch Down Zone : 굽힘 모멘트 계산 및 PSD를 이용한 주파수 영역 분석

제 4 장 라이저의 건전성 평가 기법 선정

제 4 장에서는 라이저의 건전성 평가를 위해 기존 구조물에 적용되던 손상탐지 기법을 분류 및 검토하였다. 또한 간단한 라이저 수치해석 모델에 손상탐지 기법을 적용하였고, 성능 평가를 실시하여 생산 라이저에 적합한 기법을 선정하였다.

4.1 개요

지난 수십 년간 구조물의 비파괴 손상평가 분야의 연구가 활발하게 진행되어 왔으며 현재까지 개발된 방법들은 기능별로 4개의 레벨로 분류하면 Table 3과 같다(Rytter, 1993). 본 논문에서는 동적응답을 이용하여 손상을 탐지하고 손상 위치를 추정하여 구조 건전성을 평가할 수 있는 레벨 I, II 기법을 검토하였다.

Table 3 레벨별 손상탐지 기법 분류

Level	기능
I	구조물 내 손상 유무 확인 (Detection)
II	구조물 내 손상 위치 탐색 (Localization)
III	구조물 내 손상 정도 추정 (Assessment)
IV	손상이 구조 시스템에 미치는 영향 평가 (Consequence)

손상탐지 기법을 측정 응답별로 구분하면 Table 4와 같다. 동적 응답을 이용하는 기법으로는 고유진동수의 변화를 이용한 기법, 모드형상 변화를 이용한 기법, 모드형상의 곡률 변화를 이용한 기법, 모달 변형 에너지를 이용한 기법 등으로 나눌 수 있으며, 정적 응답을 이용한 손상탐지 기법으로는 정적 변위 및 변형률을 이용한 기법이 있다. 하지만 정적 응답을 이용한 손상탐지 기법들은 실시간 건전성 모니터링에 적합하지 않으며, 해저에 설치되어 하중 재하가

어려운 단점이 있기 때문에 적용이 불가능하다. 따라서 동적 응답을 이용한 기법을 위주로 분석 및 검토하여 간략히 기술하였다.

Table 4 측정 응답별 손상탐지 기법 분류

동적 응답 이용한 손상탐지 기법
고유진동수의 변화를 이용한 기법
모드형상 변화를 이용한 기법
모드형상의 곡률 변화를 이용한 기법
변형 에너지를 이용한 기법
정적 응답을 이용한 손상탐지 기법
정적 변위를 이용한 기법
변형률을 이용한 기법

4.2 손상탐지 기법 분류

4.2.1 고유 진동수의 변화를 이용한 기법

초기 비파괴 손상평가 기법은 고유진동수를 이용하는 방법으로 시작했다. 구조물에 발생한 손상은 일반적으로 강성의 감소로 이어지고 결론적으로 고유진동수의 변화를 초래한다는 점에 착안하여 고유진동수의 변화를 측정함으로 강성의 감소를 추측하는 방법이다. 손상 전과 후의 구조물의 고유진동수를 이용한 손상 지표가 다수 제안되었으며, 이 중 대표적으로 고유진동수의 상대변화율(percentage change) $\%C_i$ 이 있으며, 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\%C_i = 100 \times \frac{\omega_i^{undamage} - \omega_i^{damage}}{\omega_i^{undamage}} \quad (4)$$

여기서 $\omega_i^{undamage}$, ω_i^{damage} 는 손상 전과 후의 i 번째 고유진동수이다. 이 기법은 구조물의 규모에 비하여 손상이 작을 경우 고유진동수에 미세한 변화만이 나타나므로 유용하지 않을 수 있다.

이와 같은 고유진동수의 변화를 이용한 기법은 다음의 특징을 갖는다. 첫째, 고유진동수는 측정 위치에 의존적이기 때문에 몇몇의 측정 지점이 필요하다. 둘째, 낮은 외부 에너지에도 측정이 가능하며 비교적 쉽게 분석할 수 있다. 셋

째, 고유진동수의 변화는 모드형상이나 모드 감쇠율과 같은 동적 특성변화 보다 적은 통계적 편차를 갖는다. 넷째, 이론적으로는 어떠한 형상의 구조물에도 적용이 가능하지만 측정 지역의 온도, 습도, 대기압 등의 환경적 변수에 영향을 받게 된다.

4.2.2 모드형상 변화를 이용한 기법

모드형상이란 구조물이 특정 진동수로 진동을 할 경우 나타나는 일정한 형상을 말한다. 구조물의 모드형상을 구하기 위해서는 고유진동수에 비해 많은 수의 센서가 필요하기 때문에 손상탐지에 이용하기는 쉽지 않지만 고유진동수에 비해 많은 정보를 담고 있기 때문에 유용하다.

모드형상을 이용한 손상탐지 기법은 일반적으로 손상 전후 모드형상을 비교하여 불일치하는 곳에서 손상이 있음을 의미하게 된다. West(1984)와 Wolff & Richardson(1989)는 모드 형상을 비교하기 위하여 모드상관계수(Modal Assurance Criterion, MAC)를 제안하였다. 모드상관계수는 식 (5)와 같이 계산된다.

$$MAC(A, X) = \frac{(\{\psi_A\}^T \{\psi_X\})^2}{(\{\psi_A\}^T \{\psi_A\})(\{\psi_X\}^T \{\psi_X\})} \quad (5)$$

여기서 $\{\psi_A\}$, $\{\psi_X\}$ 는 각각의 모드 형상을 나타낸다. MAC 값은 두 모드 사이의 유사정도를 나타내는 값으로 두 모드가 완전히 같은 경우에는 1, 완전히 다른 경우는 0이다. Fox(1992)는 MAC 값은 손상에 의한 모드 형상의 변화에는 민감하지 못한 것으로 나타났으나, 특정 모드의 측정 지점에 가까운 노드에서 민감하게 나타난 것을 확인하였다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 Lieven & Ewins(1988)는 좌표모드상관계수(Coordinate Modal Assurance Criterion, COMAC) 기법을 제안하였으며, 식 (6)을 통해서 구할 수 있다.

$$COMAC(i) = \frac{\sum_{l=1}^L |(\psi_X)_{il}(\psi_A)_{il}|^2}{\left(\sum_{l=1}^L \{\psi_X\}_{il}^2\right) \left(\sum_{l=1}^L \{\psi_A\}_{il}^2\right)} \quad (6)$$

여기서 $(\psi_A)_{il}$, $(\psi_X)_{il}$ 은 손상 전후의 L 개의 측정개소 중 l 번째 개소의 i 번 모드 형상 값을 나타낸다. COMAC은 두 모드간의 유사도를 절점별로 나타낸 것으로 0과 1사이의 값을 갖게 되며, COMAC 값이 0에 가까울수록 손상이 있음을 의미한다. Salalwu & Williams(1995)는 철근콘크리트 교량에 대해 보수 전과 후의 상태에 대한 효과를 알아보기 위해 모달 테스트를 실시하였다. 교량의 고유진동수에서는 보수 위치를 찾을 수 없었으나, MAC 값과 COMAC 값에서는 보수 위치를 정확하게 찾을 수 있음을 확인하였다.

4.2.3 모드형상의 곡률 변화를 이용한 기법

일반적으로 모드형상은 손상에 대한 민감도가 다른 진동 특성에 비해 크지 않고 특정 영역에 발생한 손상에만 민감하다. 때문에 모드형상의 곡률 변화를 이용한 기법에 대한 연구가 활발히 진행되었다.

Pandey, et al.(1991)은 모드형상의 곡률 변화를 이용하여 구조물의 손상평가 기법을 제안하였다. 이 기법은 Euler-Bernoulli 보의 휨-응력 이론과 모드 형상을 중앙 차분 근사법을 이용하여 구한 곡률을 사용하여 켄틸래버 보와 단순보의 손상을 탐지하였다. 이 기법은 한개 이상의 모드를 사용하는 경우 추정 결과가 다를 수 있는 단점을 갖고 있다.

Wahab & Roeck(1999)는 각 모드의 곡률 변화를 하나의 손상도로 결정하는 기법을 제안하였다. 단순보, 2경간 연속보 수치해석 모델에 적용하였으며, 스위스에 있는 Z24 다리에 적용하여 검증하였다. 제안된 기법은 손상과 관련된 응답 데이터를 직접적으로 사용하기 때문에 수치해석 모델이 필요 없는 장점이 있다. 또한 상시 진동 응답을 통해 추출된 모드형상을 사용하면 구조물의 실시간 건전성 모니터링에 적용이 우수하다. 하지만 휨-응력 공식에 기반된 기법이 기 때문에 측방향 모드에 대해 고려되지 않았으며, 전반적으로 강성이 감소하는 경우에는 손상을 예측할 수 없다.

Ho & Ewins(2000)은 모드형상의 곡률에 기반한 손상지수인 Mode Shape Curvature Square (MSCS)를 제시하였으며 식 (7)과 같이 정의된다.

$$MSCS = \sum_i \left| \left((\Phi_i^{damaged})'' \right)^2 - \left((\Phi_i^{undamaged})'' \right)^2 \right| \quad (7)$$

이 기법은 노드점 또는 경계부에서 탐지가 어려울 수 있으며, 특히 계측 및 경계부의 불확실성에 의해 손상탐지의 정확성이 영향을 받을 수 있다.

4.2.4 변형 에너지를 이용한 기법

Stubbs, et al.(1992)는 측정된 모드 형상으로부터 모달 변형 에너지의 변화를 사용하여 손상 위치와 정도를 평가할 수 있는 손상 지수법(Damage Index Method)을 개발하였으며 모달 변형 에너지 U_{ij} 는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$U_{ij} = \frac{1}{2} \Phi_i''^T K_j \Phi_i'' \quad (8)$$

여기서 Φ'' 는 모드형상의 곡률이며, K 는 대상 구조물의 강성이다. 손상 지수법은 구조물의 질량, 감쇠 및 강성 변화와 모달 응답 변화 사이의 민감도 관계를 기반으로 손상에 의한 변형에너지 분포의 변화를 이용하여 손상을 평가하는 방법이다. 이 기법의 타당성과 실용성을 검증하기 위해 I-40 교량에서 실험을 통해 입증하였다(Stubbs, et al., 1995). Stubbs & Kim(1996)은 초기 동적 특성이 없을 경우에도 손상 탐지를 수행할 수 있는 기법을 개발하였다. 추후 이 기법은 Euler-Bernoulli 보, 플레이트(Choi & Strubbs, 1997; Cornwell, et al., 1999), 프레임(Stubbs, et al., 2000), 트러스(Duffey, et al., 1998), 원통형 쉘(Srinivasan & Kot, 1998) 등에 적용하는 손상탐지 기법들이 개발되었다.

라이저는 일반적으로 장력보(Tensioned beam) 형태로 모델링되기 때문에 라이저에 적용하기 위해서는 보 구조물에서 변형 에너지를 이용한 손상 지수법을 적용하여야 한다. $N(j=1,2,\dots,N)$ 개의 구조 부재로 구성되어 있는 임의의 Euler Bernoulli 보 구조물에서 손상 전과 손상 후의 모드 형상을 알고 있다고 가정하면, 손상 전후의 구조물의 i 차 모드의 전체 변형 에너지 중 j 번째 부재에 편중되어 있는 변형 에너지(Fraction Modal Energy), F_{ij} 는 식 (9)과 같으며, 손상 지수(Damage Index) β_j 는 식 (10)과 식 (11)를 이용하여 구할 수 있다.

$$F_{ij} = \frac{\int_a^b (EI)_j \{\Phi_i''(x)^2\} dx}{\int_0^L (EI) \{\Phi_i''(x)^2\} dx}, \quad F_{ij}^* = \frac{\int_a^b (EI)_j^* \{\Phi_i^{*''}(x)^2\} dx}{\int_0^L (EI)^* \{\Phi_i^{*''}(x)^2\} dx} \quad (9)$$

$$\beta_j = \frac{(EI)_j}{(EI)_j^*} = \frac{\frac{f_{ij}^*}{f_{ij}} + 1}{2} \quad (10)$$

여기서,

$$f_{ij} = \frac{\int_a^b \{\Phi_i''(x)^2\} dx}{\int_0^L \{\Phi_i''(x)^2\} dx}, \quad f_{ij}^* = \frac{\int_a^b \{\Phi_i''^*(x)^2\} dx}{\int_0^L \{\Phi_i''^*(x)^2\} dx} \quad (11)$$

하지만 다른 방법들과 마찬가지로 모달 변형 에너지의 변화를 사용한 기법은 적절한 모드 선정 문제와 정확한 모드형상의 표현을 위한 제한된 센서의 개수에 대한 문제가 있으며, 경계부의 불확실성에 의해 손상탐지의 정확성이 영향을 받아 노드점 또는 경계부에서 탐지가 어려울 수 있다.

앞서 기술한 손상탐지 기법들의 장·단점을 정리하면 Table 5와 같다.

Table 5 손상탐지 기법의 장·단점

기법	장점	단점
고유진동수 변화를 이용한 기법	<ul style="list-style-type: none"> - 적은 측정 개소 - 낮은 외부 에너지에도 측정 가능 - 비교적 쉬운 분석 방법 	<ul style="list-style-type: none"> - 온·습도 및 대기압 등 환경적 변수에 영향을 받음 - 심각한 손상이나 정확한 측정 없이는 손상에 대해 구분하기 힘들
모드형상 변화를 이용한 기법	<ul style="list-style-type: none"> - MAC과 COMAC을 복합적으로 사용하여 손상을 비교적 민감하게 탐지 가능 	<ul style="list-style-type: none"> - 특정 모드에 대해서는 측정 지점 근처에서만 손상을 탐지할 수 있음
모드형상의 곡률 변화를 이용한 기법	<ul style="list-style-type: none"> - 손상 위치 및 정도에 대해 탐지 가능 - 모드형상에 비해 손상에 대해 민감함 	<ul style="list-style-type: none"> - 모드형상의 변곡점 부근 손상 검출이 어려움 - 모드에 따라 결과가 다를 수 있음
변형 에너지를 이용한 기법	<ul style="list-style-type: none"> - 손상 위치 및 정도에 대해 다른 기법에 비해 정확한 탐지가 가능함 	<ul style="list-style-type: none"> - 적절한 모드 선정 문제 및 센서 개수 제한 문제

4.3 손상 위치 추정 기법

각 손상 지수를 계산한 후 손상 위치 탐지는 다양한 기법을 이용할 수 있으나 본 논문에서는 여러 방법 중 패턴인식을 이용한 손상탐지 알고리즘을 사용하였다. 패턴 인식의 경우 부재별 손상지수를 두 개의 그룹으로 분류할 수 있는데 손상이 없는 부재와 손상이 있는 부재로 분류하였다. 손상 전과 손상 후의 표준화된 손상 지수를 유한 개소의 집단으로 분류하기 위해 비교적 이용이 쉬운 Neyman-Person 기준을 택하여 사용하였으며 다음과 같은 두 가지 경우의 가설을 설정할 수 있다.

(1) 가설 H_0 : 구조물 내 부재 j 에 손상이 없음

(2) 가설 H_1 : 구조물 내 부재 j 에 손상이 있음

손상지수를 계산한 후 손상위치를 결정하는 기준은 통계적 이론으로 구할 수 있으며, 각각의 부재에 대한 손상 지수 값들은 정규 분포를 따르는 확률 변수(Random variable)이다. 따라서 표준화된 손상 지표를 구하면 식 (13)와 같다.

$$Z_j = \frac{\beta_j - \mu_\beta}{\sigma_\beta} \quad (13)$$

여기서 μ_β 와 σ_β 는 표준화된 손상 지표 β_j 값들의 평균과 표준편차를 나타낸다.

j 부재의 손상유무는 one-tailed test로부터 다음과 같이 결정할 수 있다.

1) $Z_j < Z_\eta$ 일 경우 : 가설 H_0 선택

2) $Z_j \geq Z_\eta$ 일 경우 : 가설 H_1 선택

여기서 Z_η 는 가설 테스트의 기준 값이며 이에 따라 가설테스트의 신뢰도도 달라진다. 예를 들어 기준 값을 2이라고 결정하면 가설테스트는 98%의 신뢰도를 가지게 된다.

4.4 수치해석을 통한 라이저의 손상탐지 기법 선정

라이저의 건전성 평가를 위한 손상탐지 기법을 선정하기 위해 라이저 해석 프로그램(OrcaFlex, 2010)을 사용하여 간단한 라이저의 모달 해석을 통해 앞서 검토한 기법들의 적용하여 적용성을 검토하고, 손상탐지 결과를 통해 적절한 기법을 선정하였다.

4.4.1 수치해석 모델링 및 모의 손상

라이저의 수치해석 모델은 American Petroleum Institute(API)(2004) X70 재질의 500m 수직관으로 하였으며 상부 플랫폼은 FPSO를 적용하였다. Table 6은 모델링한 라이저의 제원이며, Fig. 26는 수치해석 모델링 형상이다.

Table 6 수치해석 모델링 제원

길이	500 <i>m</i>
외경	0.355 <i>m</i>
내경	0.333 <i>m</i>
단위 질량	94.304 <i>kg/m</i>
축강성 (EA)	$2.523 \times 10^6 \text{ kN}$
휨강성 (EI)	37,465 <i>kN · m²</i>
비틀림강성 (GJ)	$28,819 \times 10^3 \text{ kN · m2$

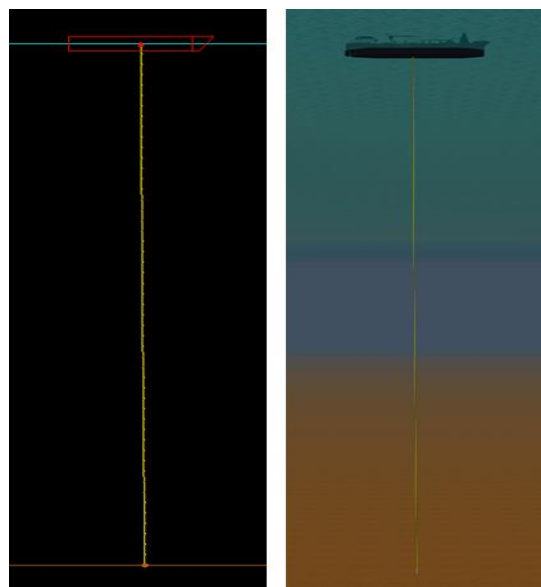


Fig. 26 수치해석 모델링 형상

수치해석 모델의 노드는 10m 간격으로 51개 생성시켜 총 50개의 부재로 구성되어 있으며, 라이저의 양단 경계조건은 핀(Pined) 집합으로 하였다. 각 기법들의 적용성을 확인하기 위하여 라이저의 탄성계수를 줄여 모의 손상을 주었으며, 각 경우별 손상 부재와 손상도는 Table 7과 같다. 손상 경우 1, 2, 3에서는 200~210m 위치에 50%, 20%, 10%의 각기 다른 손상도를 주어 손상 정도에 따른 탐지 능력을 확인하였으며, 손상 경우 4, 5에서는 2개소에, 손상 경우 6에서는 3개소에 10m씩 손상을 주어 다중 손상 위치 탐지 가능 여부를 판단하였다. 손상 부재의 위치 및 부재번호는 Fig. 27과 같다.

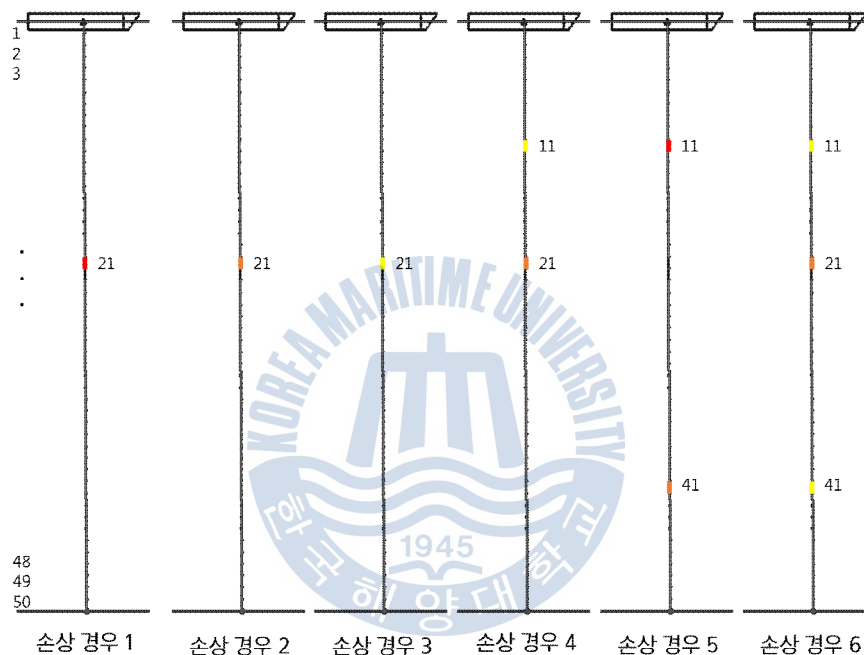


Fig. 27 손상 경우별 모의 손상 위치

Table 7 손상 경우별 모의 손상 부재 및 손상도

손상경우	부재 번호	손상도 α_j (%)
1	21	50
2	21	20
3	21	10
4	11, 21	10, 20
5	11, 41	50, 10
6	11, 21, 41	10, 20, 10

4.4.2 기법별 손상탐지 결과

(1) 고유 진동수의 변화를 이용한 기법 적용

모델링한 라이저의 모달 해석 결과 Table 8과 같은 손상 경우별 고유진동수를 구하였다.

Table 8 손상 경우별 고유진동수

단위 : Hz	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
비손상	0.02431	0.04822	0.07448	0.10334	0.13531
손상경우 1	0.02427	0.04816	0.07432	0.10304	0.13511
손상경우 2	0.0243	0.0482	0.07444	0.10326	0.13526
손상경우 3	0.02431	0.04821	0.07446	0.1033	0.13529
손상경우 4	0.02429	0.04818	0.0744	0.10323	0.13522
손상경우 5	0.02424	0.04805	0.07418	0.10306	0.13499
손상경우 6	0.02429	0.04819	0.0744	0.10322	0.13524

손상탐지 결과 고유진동수가 비손상 경우와 비교하여 손상 경우에 작아진 것을 확인할 수 있으며, 같은 부재에 손상정도를 달리한 손상 경우 1, 2, 3에서 점차 고유진동수가 미소하지만 작아지는 것을 확인할 수 있다. 고유진동수의 변화를 상대 변화율로 나타내면 Table 9와 같다.

Table 9 손상 경우별 고유진동수의 상대변화율(%)

손상경우	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	평균
1	0.164541	0.12443	0.214823	0.290304	0.147809	0.188381
2	0.041135	0.041477	0.053706	0.077414	0.036952	0.050137
3	0	0.020738	0.026853	0.038707	0.014781	0.020216
4	0.082271	0.082953	0.107411	0.106445	0.066514	0.089119
5	0.287947	0.352551	0.402793	0.27095	0.236494	0.310147
6	0.082271	0.062215	0.107411	0.116122	0.051733	0.08395

하지만 고유진동수의 변화를 이용하는 기법은 고유진동수 차가 매우 미소하며, 환경 영향에 따라 조금씩 변화할 수 있기 때문에 라이저에 적용하기 어려울 것으로 판단된다.

(2) 모드형상의 변화를 이용한 기법 적용

모드 형상의 변화를 이용한 기법은 MAC 값을 이용하여 0에 가까울수록 손상이 있음을 확인할 수 있으며, COMAC 값은 앞서 기술한 손상 위치 추정 기법을 적용하기 위해 COMAC 값의 역수를 사용하여 손상지수를 계산하였다. 각 결과 값을 얻기 위해 Fig 28과 같은 3개의 굽힘 모드형상을 이용하였으며, 손상 위치 추정을 위한 가설 테스트의 기준 값은 1.5로 93%의 신뢰도를 갖는 결과를 나타낸다. 손상 경우에 따른 MAC 값과 COMAC 값을 이용한 손상탐지 결과는 Table 10과 Fig. 29에 표현하였다.

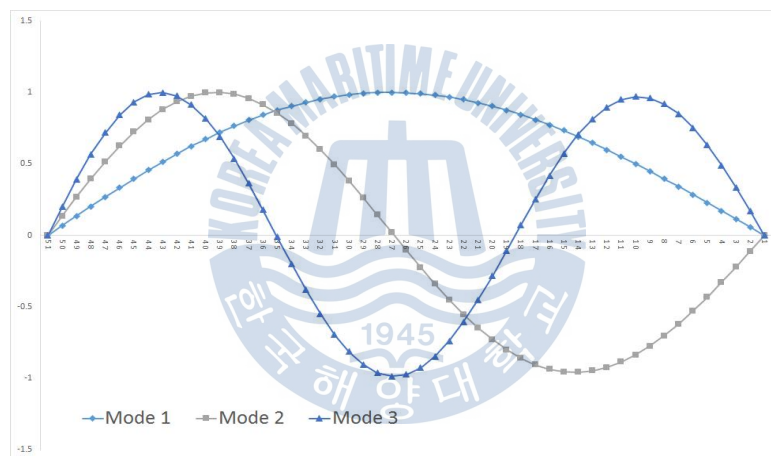


Fig. 28 수치해석 모델의 모드형상 1-3

Table 10 손상 경우별 MAC 값

손상경우	Mode 1	Mode 2	Mode 3
1	9.9999933E-01	9.9999805E-01	9.9995920E-01
2	9.9999995E-01	9.9999984E-01	9.9999670E-01
3	9.9999999E-01	9.9999997E-01	9.9999931E-01
4	9.9999993E-01	9.9999978E-01	9.9999474E-01
5	9.9999923E-01	9.9998399E-01	9.9996021E-01
6	9.9999993E-01	9.9999978E-01	9.9999635E-01

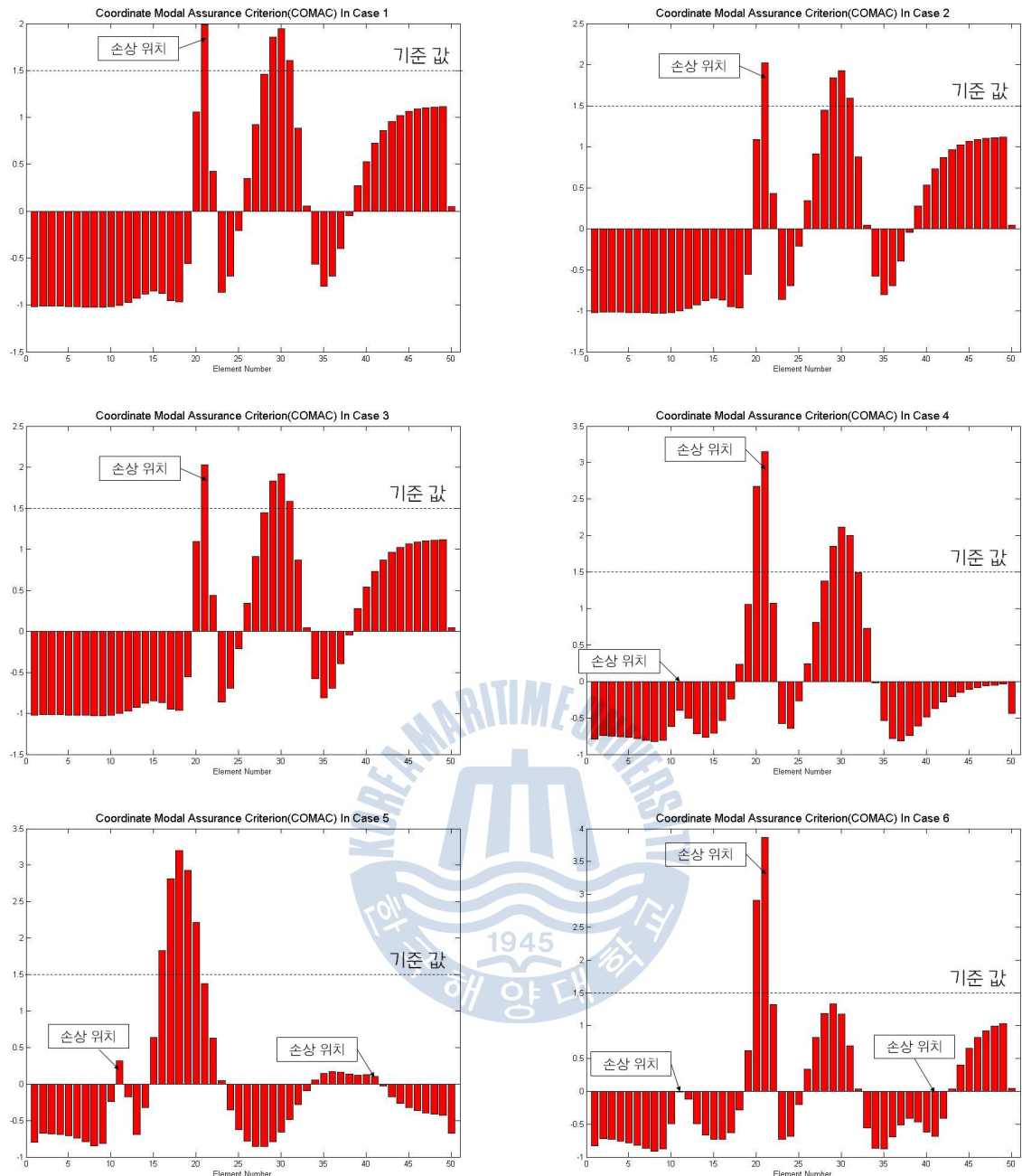


Fig. 29 COMAC 값을 이용한 손상탐지 결과

모드 형상의 변화를 이용하여 손상탐지를 실시한 결과 MAC 값은 고유진동수를 이용한 방법과 같이 손상정도에 따른 약간의 차이를 보이고 있다. 하지만 이는 실제 측정할 경우 외부 환경 영향에 의해 예측되기 쉽지 않을 것으로 판단된다. 또한 COMAC 값을 이용한 손상탐지 결과 손상 경우 1-3의 경우 손상을 탐지하고 위치를 추정할 수 있었다. 하지만 손상 경우 4의 경우 손상 위치 1곳만 찾아내었고 손상 경우 5에서는 손상을 찾아내지 못하였다. 또한 손상 경

우 6에서는 중간의 1개소 손상은 찾아내었으나, 상단과 하단의 손상은 찾아 내지 못하였다. 모드 형상을 이용한 기법 역시 미소한 변화량만 생겨 실제 계측하여 모드형상을 구하는 경우 환경 및 하중에 의한 노이즈에 의해 정확히 측정하지 못할 수 있다.

(3) 모드형상의 곡률 변화를 이용한 기법 적용

모달 해석을 통해 추출한 모드형상을 이용하여 곡률을 계산하고 MSCS를 이용한 손상 탐지 기법을 적용하였다. 가설 테스트의 기준 값은 전과 동일하게 1.5로 설정하였다. 각 손상 경우별 곡률과 손상 탐지한 결과는 Figs 30-33에 표현하였다.

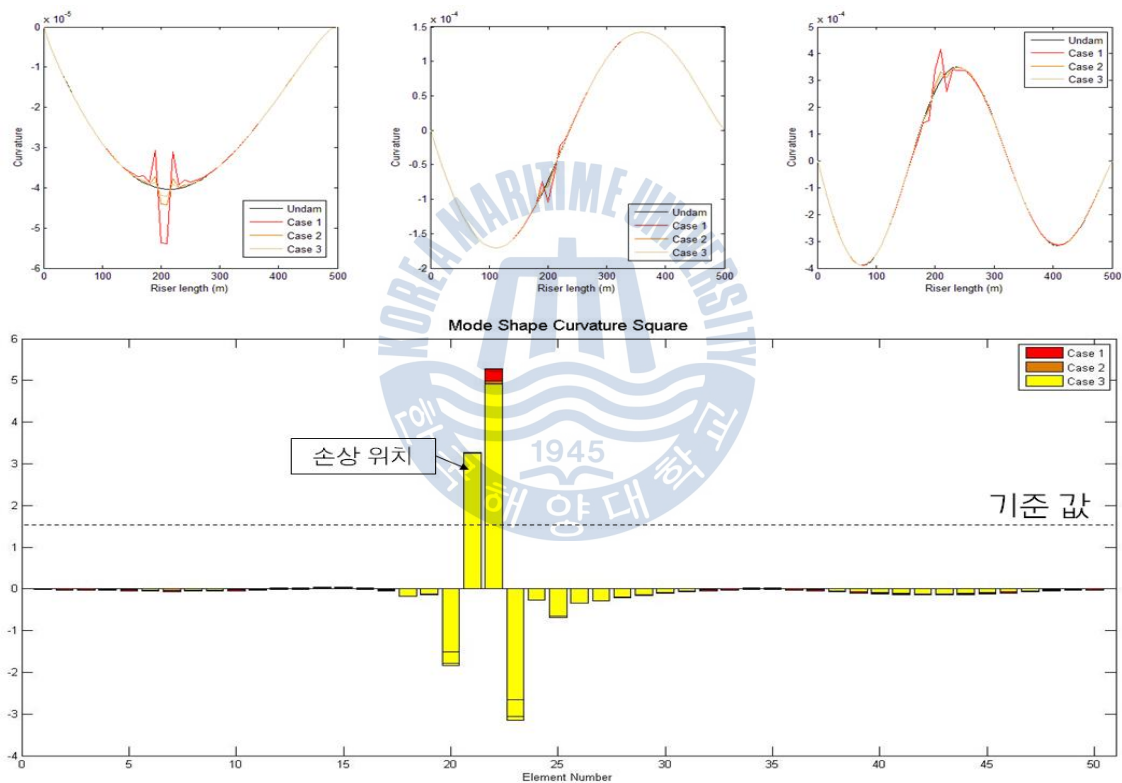


Fig. 30 손상 경우 1-3의 모드형상 곡률 및 손상탐지 결과

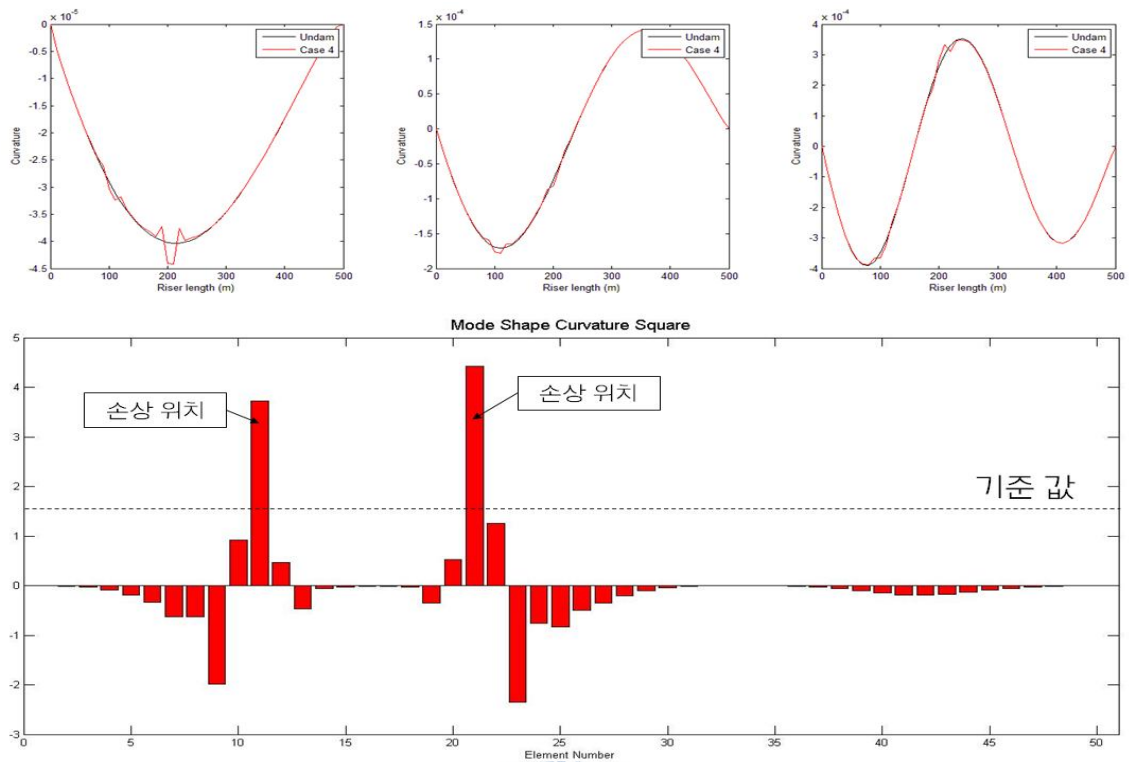


Fig. 31 손상 경우 4의 모드형상 곡률 및 손상탐지 결과

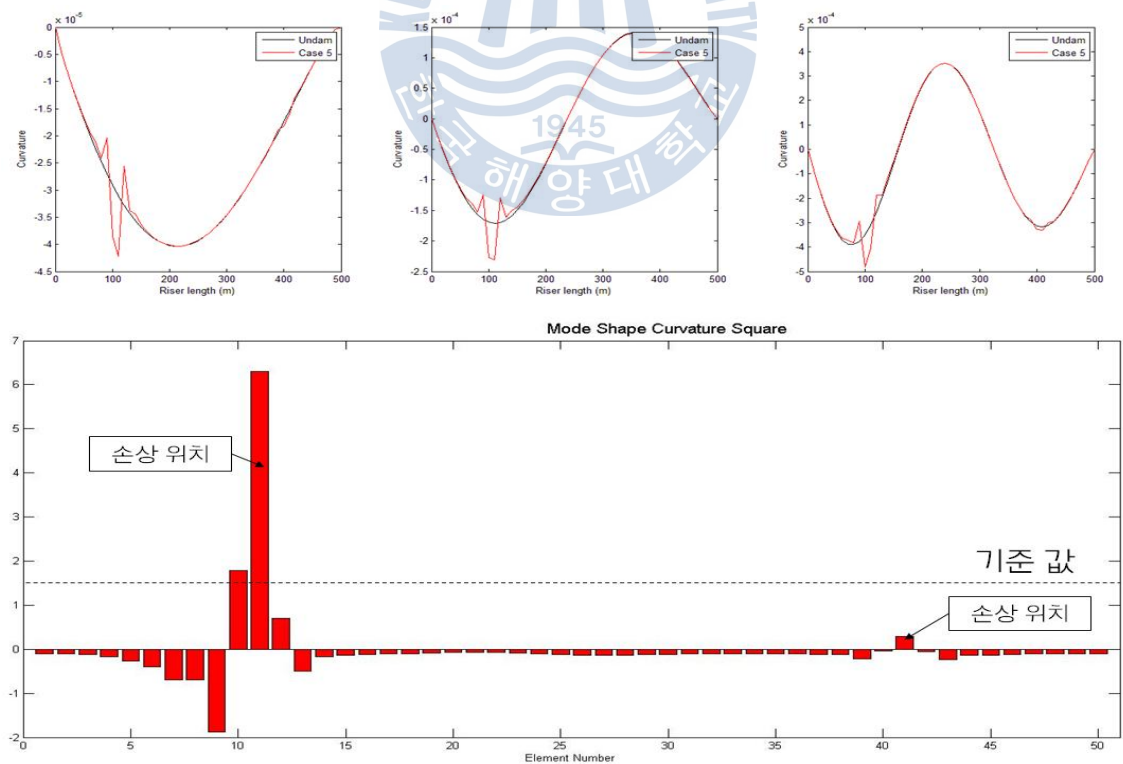


Fig. 32 손상 경우 5의 모드형상 곡률 및 손상탐지 결과

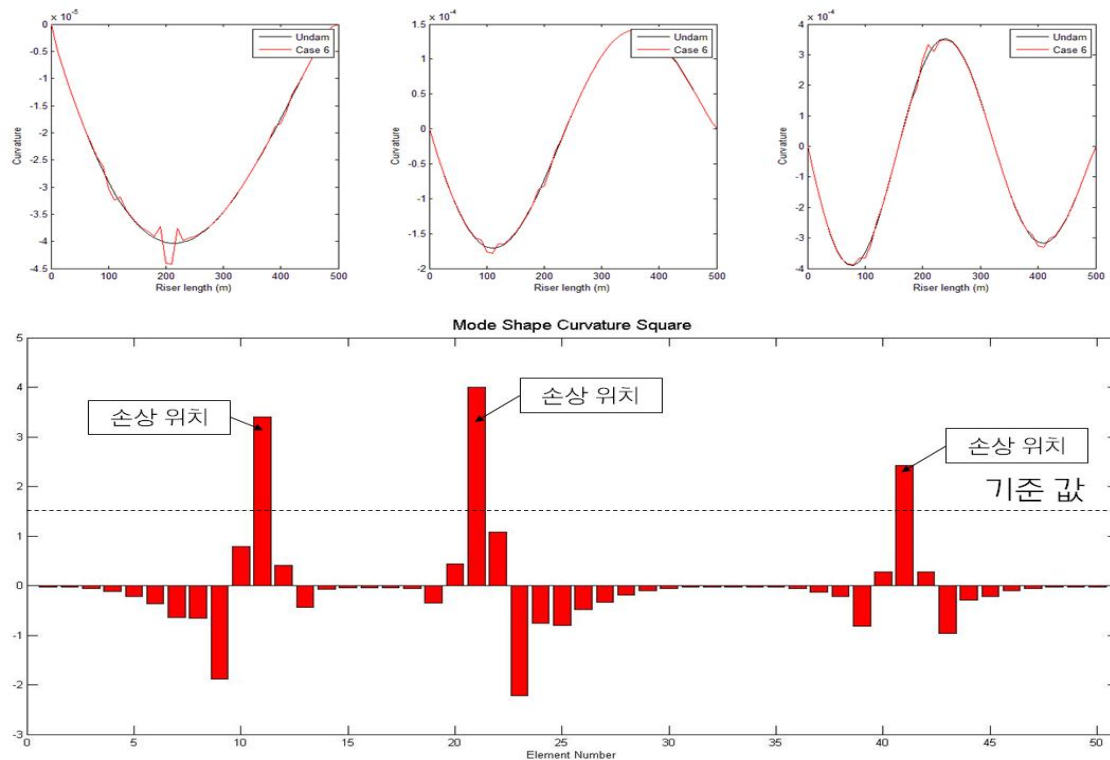


Fig. 33 손상 경우 6의 모드형상 곡률 및 손상탐지 결과

모드형상의 곡률을 이용한 손상탐지 결과 고유진동수와 모드형상을 이용한 기법에 비해 비교적 손상 위치를 정확히 찾을 수 있었으며, 손상 경우 1-3인 경우 Fig. 30과 같이 손상 정도에 따라 값이 미소하지만 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 손상 경우 4와 6에서는 여러 개소의 손상에 대해서 손상을 찾아 내었으며 상대적으로 손상도가 적은 위치에서 손상도가 적게 나오는 것을 확인할 수 있다. 하지만 손상 경우 5에서는 한 개의 손상 개소만 찾아내었다. 이는 상단의 손상에 비해 하단의 손상이 미소하여 마스킹 효과에 의해 손상을 찾아 내지 못한 것으로 사료된다.

(4) 모달 변형 에너지를 이용한 기법 적용

변형 에너지를 이용한 기법은 여러 응답을 이용할 수 있으나 본 논문에서는 모드형상의 곡률을 이용하여 계산한 모달 변형 에너지를 통해 손상탐지를 실시하였다. 손상탐지 결과는 1-3차 굽힘 모드를 이용하였으며, 가설 테스트의 기준 값은 전과 동일하게 1.5로 설정하였다. 각 손상 경우별 손상탐지 결과는 Figs. 34-39과 같다.

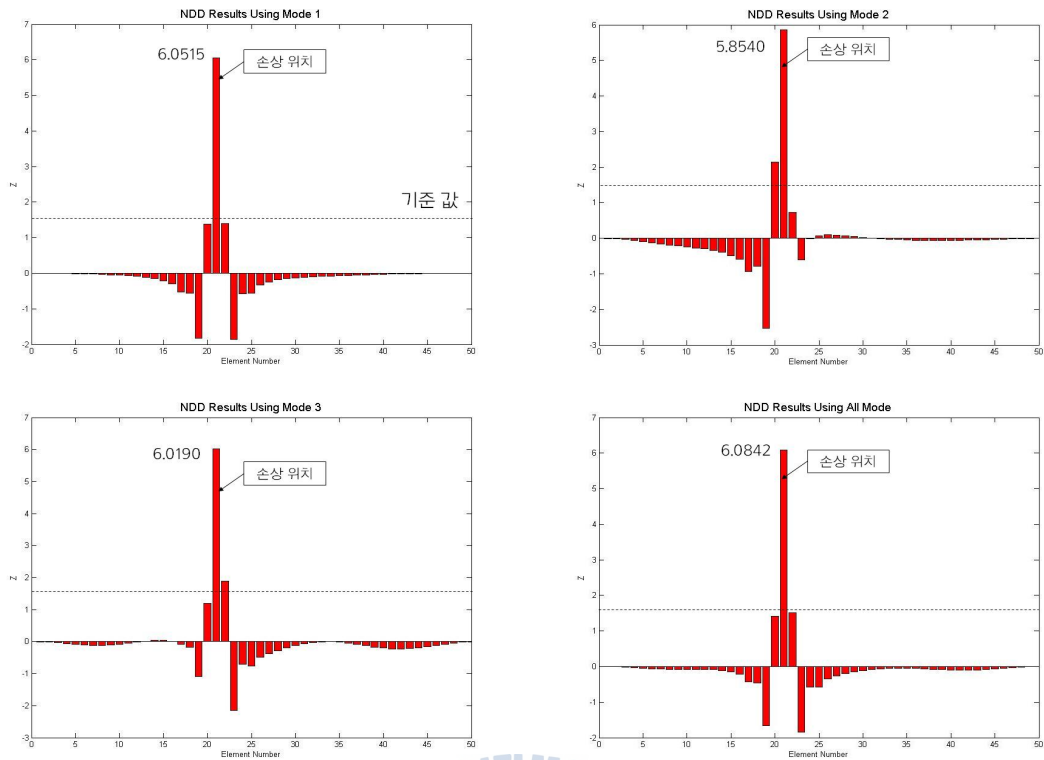


Fig. 34 손상 경우 1의 손상탐지 결과

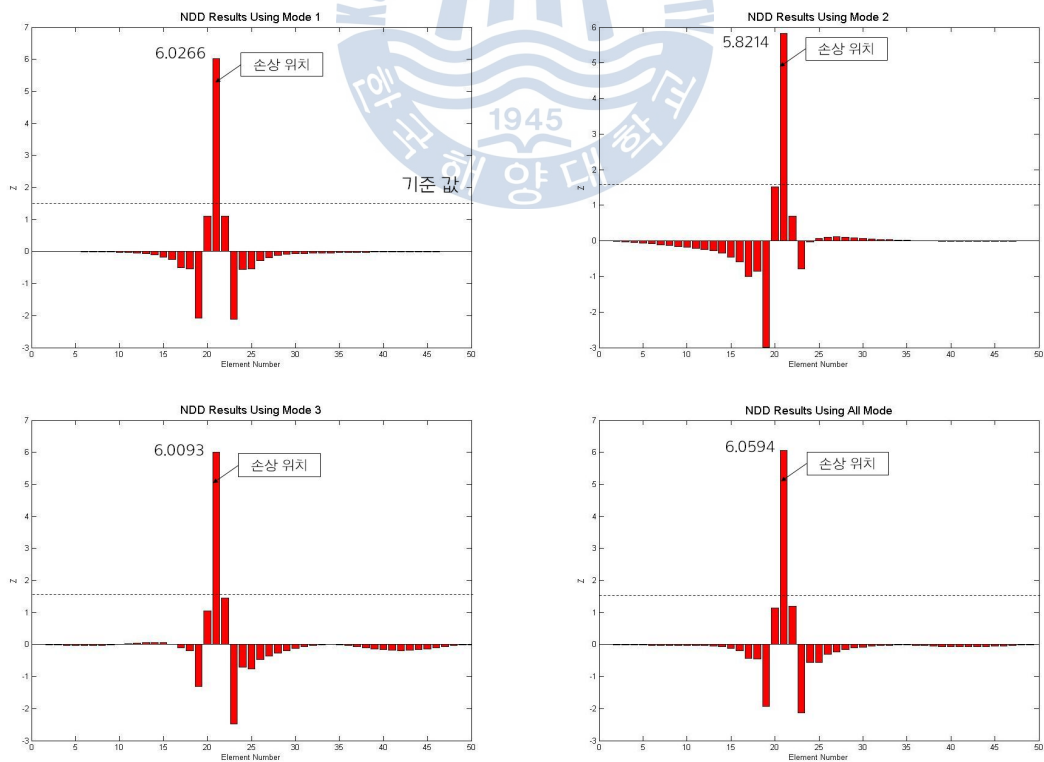


Fig. 35 손상 경우 2의 손상탐지 결과

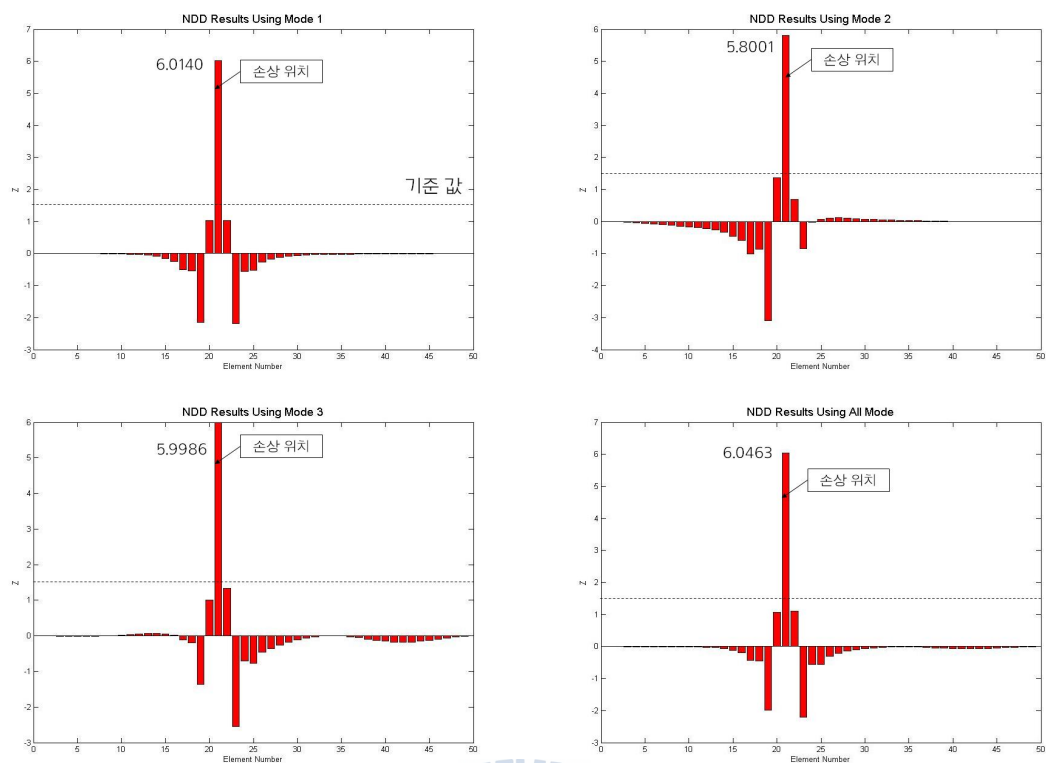


Fig. 36 손상 경우 3의 손상탐지 결과

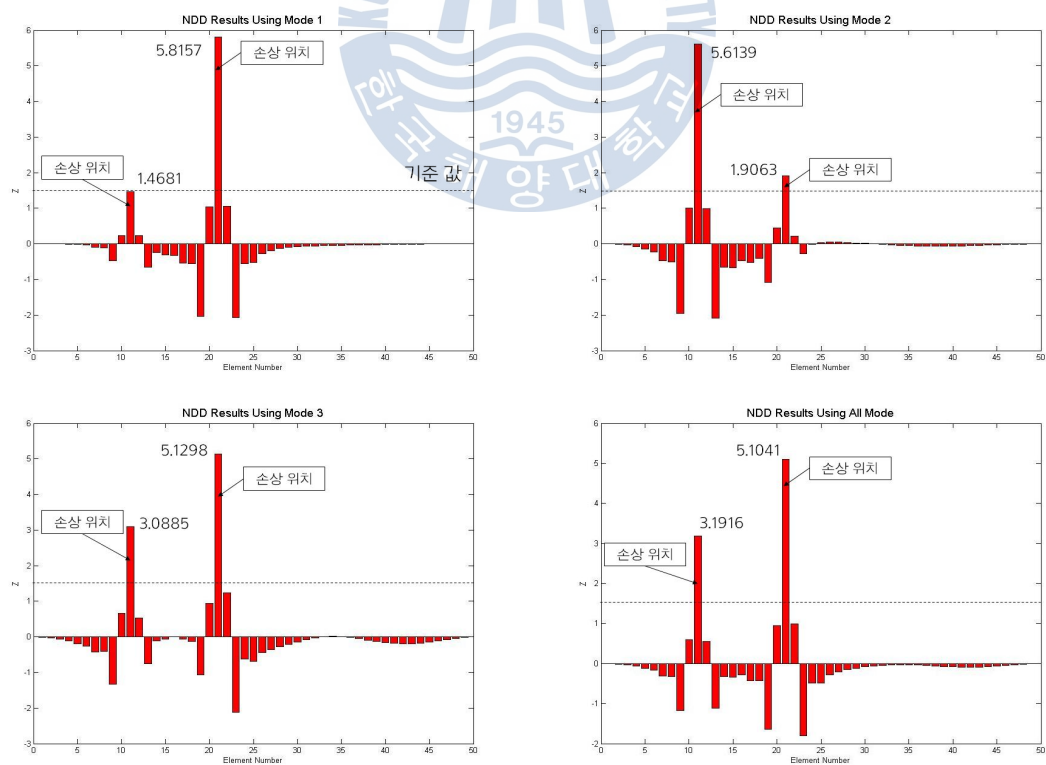


Fig. 37 손상 경우 4의 손상탐지 결과

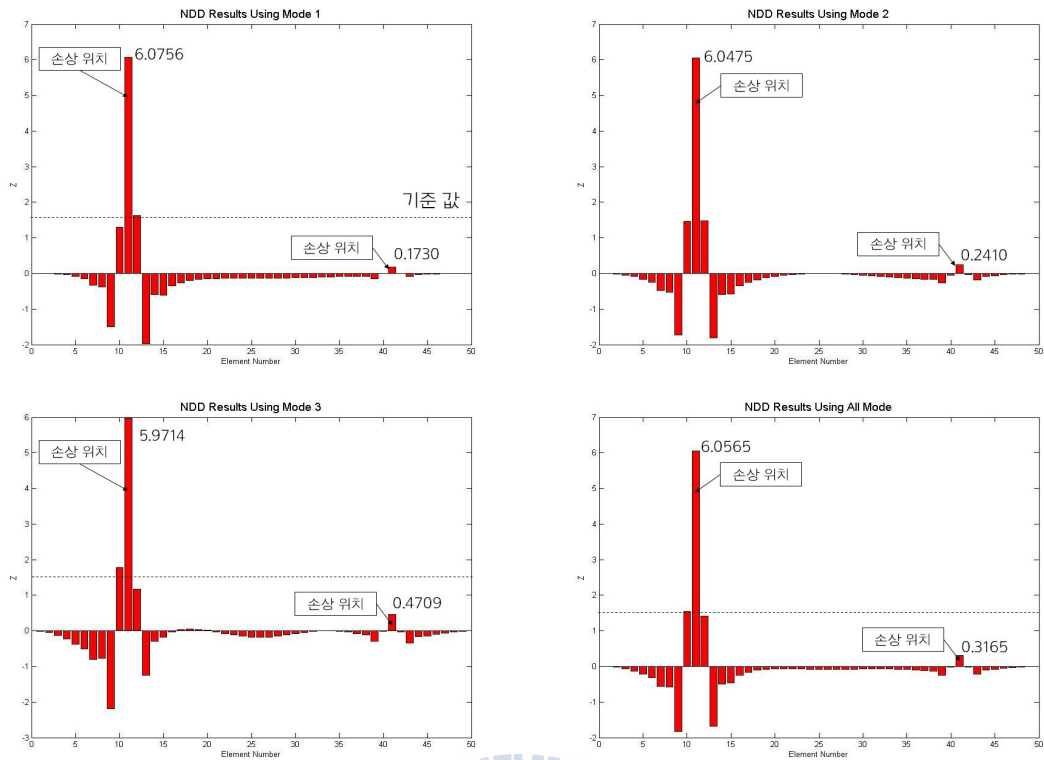


Fig. 38 손상 경우 5의 손상탐지 결과

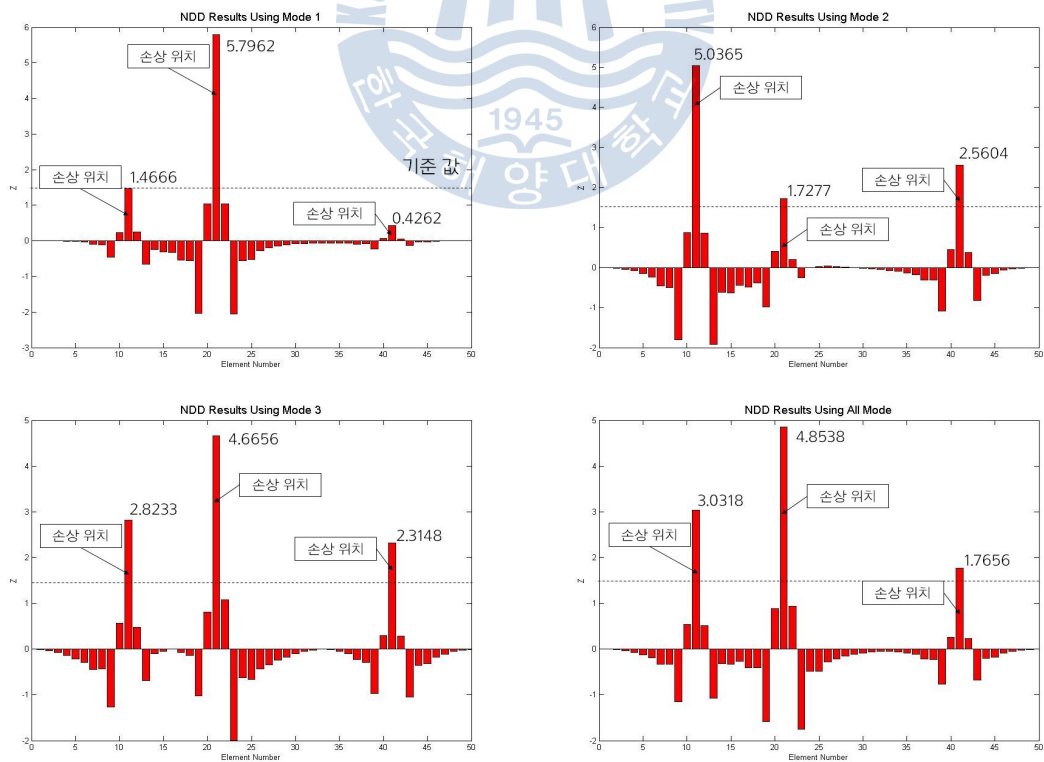


Fig. 39 손상 경우 6의 손상탐지 결과

각 손상 경우에 대해 손상 탐지를 실시한 결과 다른 기법들에 비해서 비교적 손상을 정확하게 검출하였으며, 손상 경우 1, 2, 3과 같은 경우 손상위치를 정확히 찾았으며, 작지만 손상도에 따라 손상지수가 감소함을 확인할 수 있었다.

또한 손상 경우 4의 경우 모드 1만 사용하여 손상탐지를 실시한 결과에서는 손상을 1개만 찾아냈으나, 굽힘모드 2와 3을 이용한 경우에는 2개의 손상을 모두 찾아낼 수 있었다. 또한 3개의 모드를 합성하여 손상탐지를 실시한 경우 역시 손상 위치를 정확히 탐지하였다.

하지만 손상 경우 5의 경우 상단의 50% 손상에 대해서는 모든 모드에서 탐지할 수 있었으나, 400~410m 위치의 손상에 대해서는 탐지하지 못하였다. 이는 상단의 손상에 비해 하단의 손상이 작아 마스킹 효과가 발생한 것으로 판단된다.

손상 경우 6의 경우 Fig. 38과 같이 모드 1을 이용한 경우 한 개의 손상을 탐지하였지만, 모드 2와 3, 그리고 합성 모드를 사용한 경우 손상 위치를 정확하게 탐지하였다. 손상도에 따른 손상지수를 비교하면 모드 2의 경우 손상도와 상관없는 결과를 나타내었다. 하지만 모드 3과 합성모드를 이용한 경우 손상도에 따른 손상지수가 나타남을 확인할 수 있다.

앞서 검토한 손상탐지 기법들의 성능을 비교하기 위하여 false positive error의 비율과 false negative error의 비율로 Table 11에 나타내었다. false positive error는 실제 손상이 없는 부재에 손상이 있다고 판정한 경우로 false positive 수를 손상이 없는 부재의 수로 나눈 것이다. false negative error는 실제 손상이 있으나 손상을 찾지 못한 경우로 false negative 수를 손상이 있는 부재의 수로 나눈 것이다. 가장 좋은 경우는 false positive와 false negative 수가 모두 0이 되는 것이며, false positive error보다는 false negative error가 훨씬 더 중요한 의미를 가진다(박수용 등, 2004).

손상 탐지 기법의 성능을 평가한 결과 모드형상의 곡률을 이용한 손상탐지 기법과 모달 변형에너지를 이용한 손상탐지 기법이 false negative error가 낮은 결과를 보였다. 하지만 false positive error의 결과에서 모드형상의 곡률을 이용한 기법보다 모달 변형에너지를 이용한 기법이 더 낮은 결과를 나타냈다. 따라서 모달 변형에너지를 이용한 손상탐지 기법을 사용하여 생산 라이저에 적용하

는 것이 적합하다고 판단된다.

Table 11 Percentage of false positive error & false negative error

기법	False Positive Error				False Negative Error			
COMAC	손상 경우	Number of False Positive	Number of Undamaged Element	False Positive error (%)	손상 경우	Number of False Negative	Number of damaged Element	False Negative error (%)
	1	3	49	6.12	1	0	1	0
	2	3	49	6.12	2	0	1	0
	3	3	49	6.12	3	0	1	0
	4	4	48	8.33	4	0	2	0
	5	5	48	10.42	5	2	2	100
	6	1	47	2.13	6	1	3	33.3
MSCS	손상 경우	Number of False Positive	Number of Undamaged Element	False Positive error (%)	손상 경우	Number of False Negative	Number of damaged Element	False Negative error (%)
	1	1	49	2.04	1	0	1	0
	2	1	49	2.04	2	0	1	0
	3	1	49	2.04	3	0	1	0
	4	0	48	0	4	0	2	0
	5	1	48	2.08	5	1	2	50
	6	0	47	0	6	0	3	0
Modal Strain Energy	손상 경우	Number of False Positive	Number of Undamaged Element	False Positive error (%)	손상 경우	Number of False Negative	Number of damaged Element	False Negative error (%)
	1	0	49	0	1	0	1	0
	2	0	49	0	2	0	1	0
	3	0	49	0	3	0	1	0
	4	0	48	0	4	0	2	0
	5	1	48	2.08	5	1	2	50
	6	0	47	0	6	0	3	0

제 5 장 라이저 건전성 평가의 실용성을 위한 센서 개수 선정

실제 생산 라이저에 4장에서 선정한 기법을 적용하기 위해서는 적절한 모드 선정 문제뿐 아니라 정확한 모드형상 추출이 중요하다. 이를 위해서는 다수의 센서를 부착하여 측정하는 것이 이상적이나 현실적으로 어렵기 때문에 적절한 센수 개수를 선정하는 것은 중요하다. 따라서 5장에서는 수치해석을 통해 선정한 모달 변형에너지를 이용한 기법을 적용하여 센서 개수를 줄여가며 손상 탐지 여부를 확인하여 생산 라이저에 사용 가능한 센서 개수를 선정하였다.

5.1 수치해석 모델링

센서 개수를 선정하기 위한 생산 라이저의 모델링은 Fig. 40과 같이 OrcaFlex(2010) 프로그램을 사용하여 모델링 하였다. 라이저는 API(2004) X70 재질의 1200m 수직관으로 하였으며, 양단의 지지는 핀 접합으로 하였고 상부 플랫폼은 FPSO를 적용하였다. 모델링 체원은 4장의 수치해석 모델과 같으며, Line Element 요소를 120개로 분할하여 모달 해석을 수행하였다.

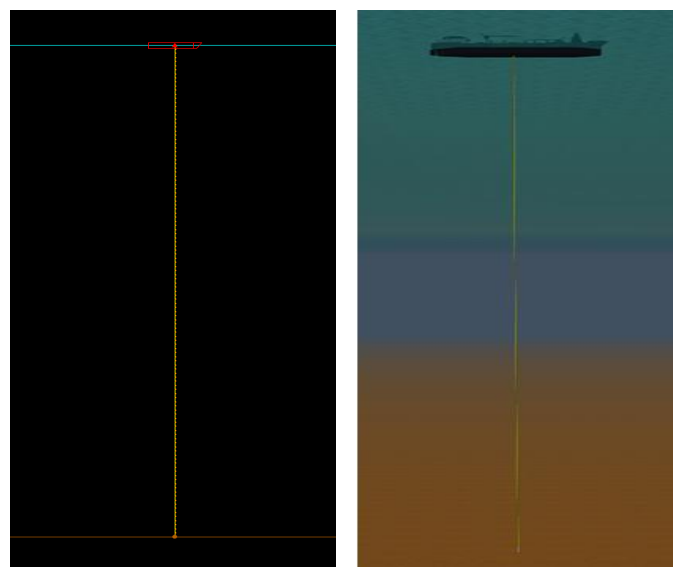


Fig. 40 수치해석 모델링

5.2 모의 손상 시나리오

적절한 센서 개수를 선정하기 위하여 수치해석 모델에 Table 14와 같이 단일 개소의 손상을 2가지 경우로 손상을 모사하였다. 모달 변형에너지를 이용하는 경우 센서 근처의 손상에 대해서 민감하기 때문에 손상 경우 1은 센서 부근에 손상이 발생한 경우로, 손상 경우 2는 센서와 센서 중간에 손상이 발생한 경우로 설정하였다. 모의 손상은 4장에서와 같은 방법으로 부재의 탄성계수를 감소시켜 강성을 저하시켰다.

Table 14 센서 개수에 따른 손상 경우별 손상 위치 및 손상도

센서 개수	손상 경우	손상 부재 번호	손상도 α_j (%)
7	1	41	20
	2	71	
9	1	46	20
	2	68	
11	1	37	20
	2	79	
13	1	41	20
	2	66	
16	1	41	20
	2	69	

센서 개수 경우는 7개, 9개, 11개, 13개, 16개로 총 5가지 경우에 대하여 검토를 하였으며, 개수별 센서 배치도 및 손상 경우에 대하여 Fig. 41에 표현하였다.

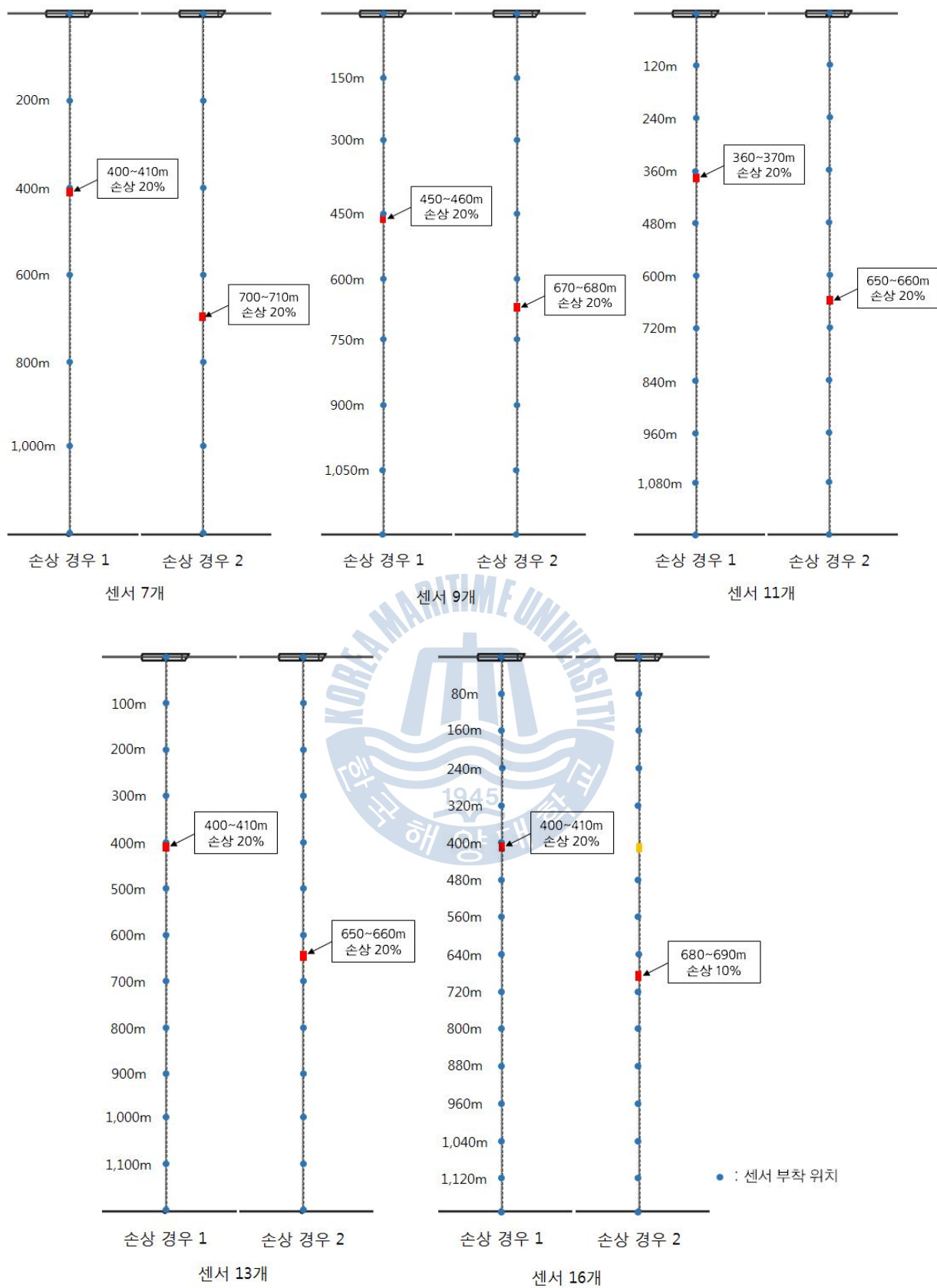


Fig. 41 센서 개수별 센서 배치도 및 손상 위치

5.3 수치해석 모델의 손상탐지 및 센서 개수 선정

5.3.1 고유진동수 및 모드형상

손상 위치를 추정하기 위해 모달 해석을 통해 손상 전과 손상 후의 모드형상을 3개씩 추출하였다. 라이저의 모달 해석을 수행한 결과 손상 전과 후의 고유진동수는 Table 13에 손상 전의 모드형상은 Fig. 42에 나타내었다.

Table 13 수치해석 모델의 손상 경우별 고유진동수

단위 : Hz	Mode 1	Mode 2	Mode 3
비손상	0.01382	0.02769	0.04166
손상경우 1	0.01381	0.02768	0.04165
손상경우 2	0.01382	0.02770	0.04167

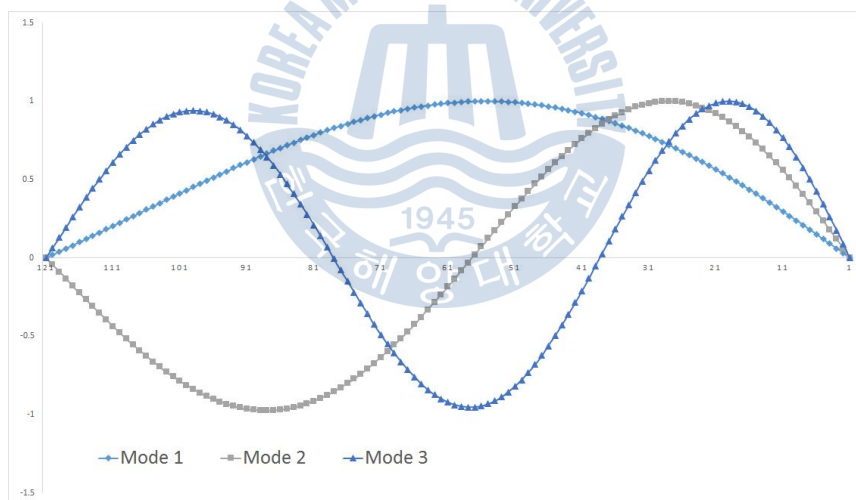
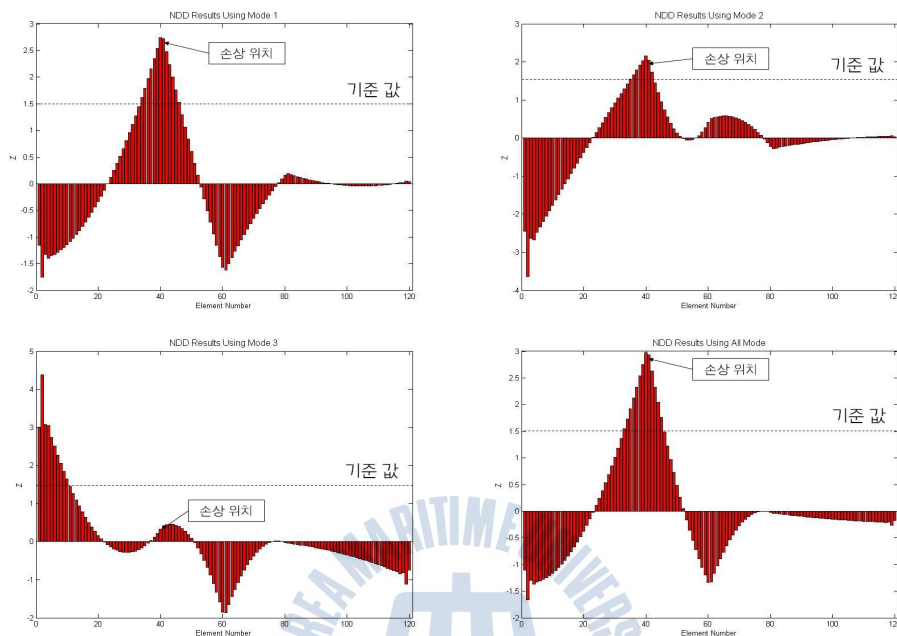


Fig. 42 손상 전 모드형상 1-3

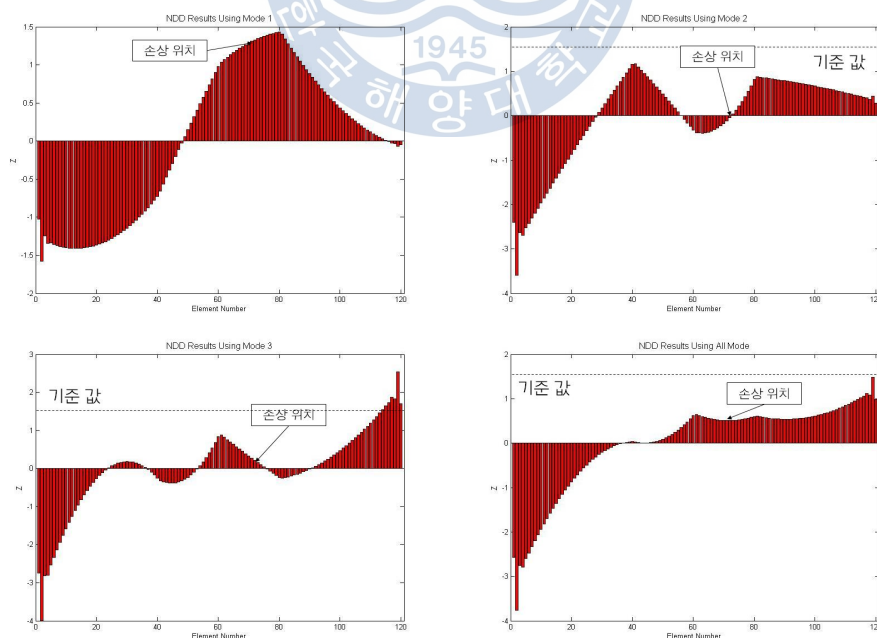
5.3.2 손상탐지 결과

추출된 모드 형상의 모달 변위를 통해 곡률을 계산하고 식 (10)과 (11)을 통해 손상지수를 구하였다. 손상탐지는 3개의 모드별 손상탐지의 결과를 합성하여 구한 결과로 나타내었다. 3개 모드를 합성하였을 때의 장점은 만일 손상이 라이저의 곡률이 변하는 곳에 발생하면 부재의 곡률은 다른 부재에 비해 훨씬

작아지기 때문에 손상탐지 시 오류가 발생할 수 있으나 여러 개의 모드를 동시에 사용하면 이런 오류를 감소시킬 수 있다. 손상탐지 결과의 일관성을 위해서 3차 스플라인(Spline) 보간법을 이용하여 모드형상을 보간 시켜 120개의 부재로 결과를 표현하였으며, 센서 개수별 손상탐지 결과는 Figs. 43-47과 같다.

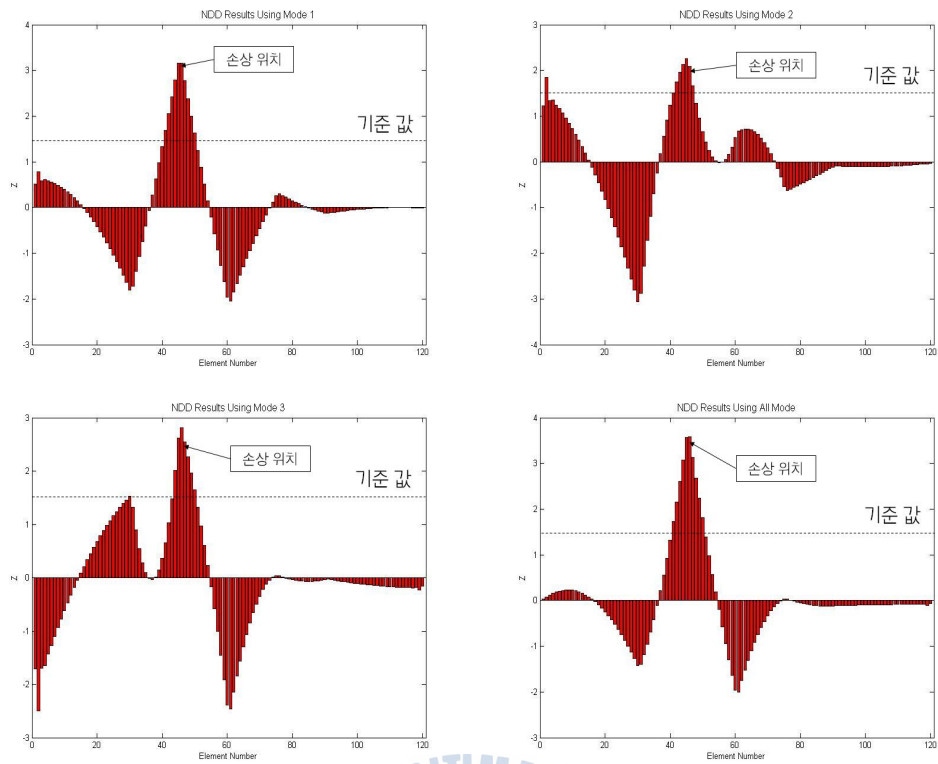


(a) 손상 경우 1

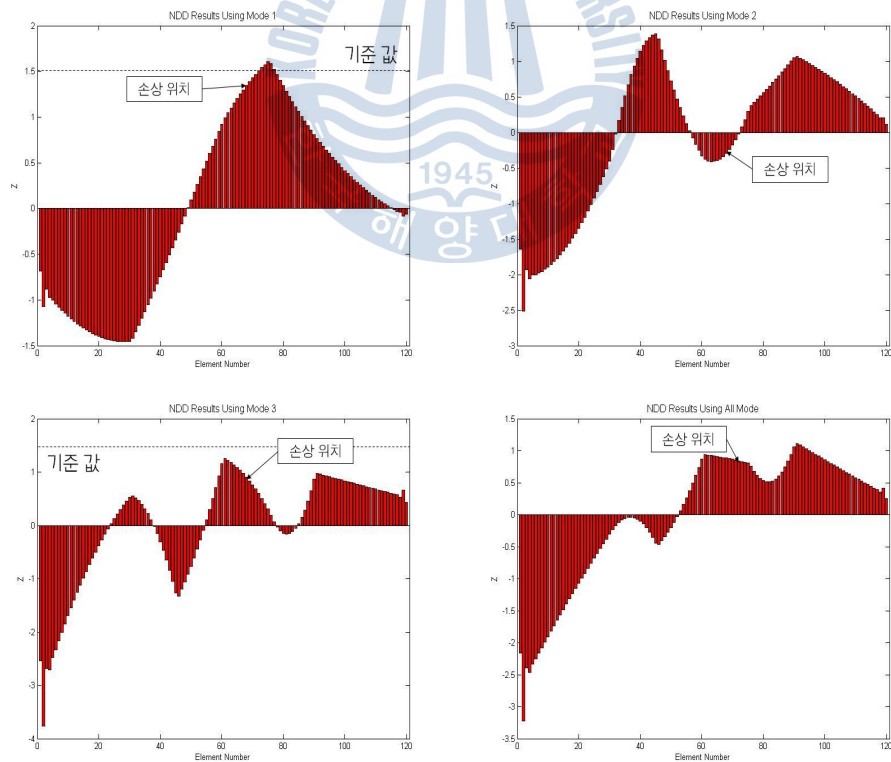


(b) 손상 경우 2

Fig. 43 센서 7개인 경우 손상탐지 결과

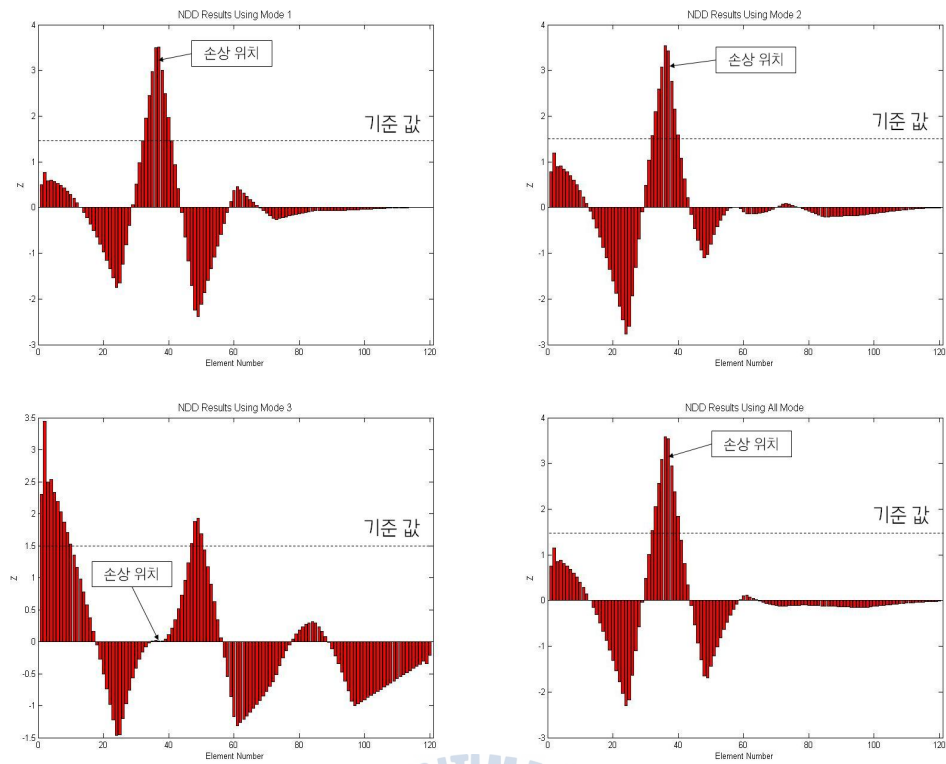


(a) 손상 경우 1

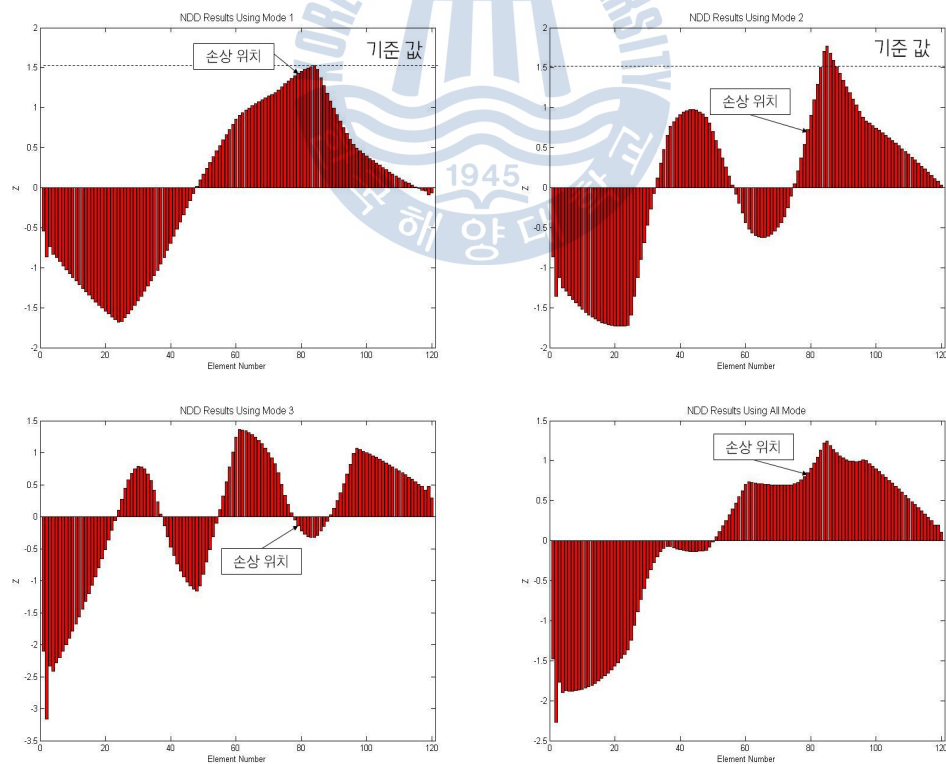


(b) 손상 경우 2

Fig. 44 센서 9개인 경우 손상탐지 결과

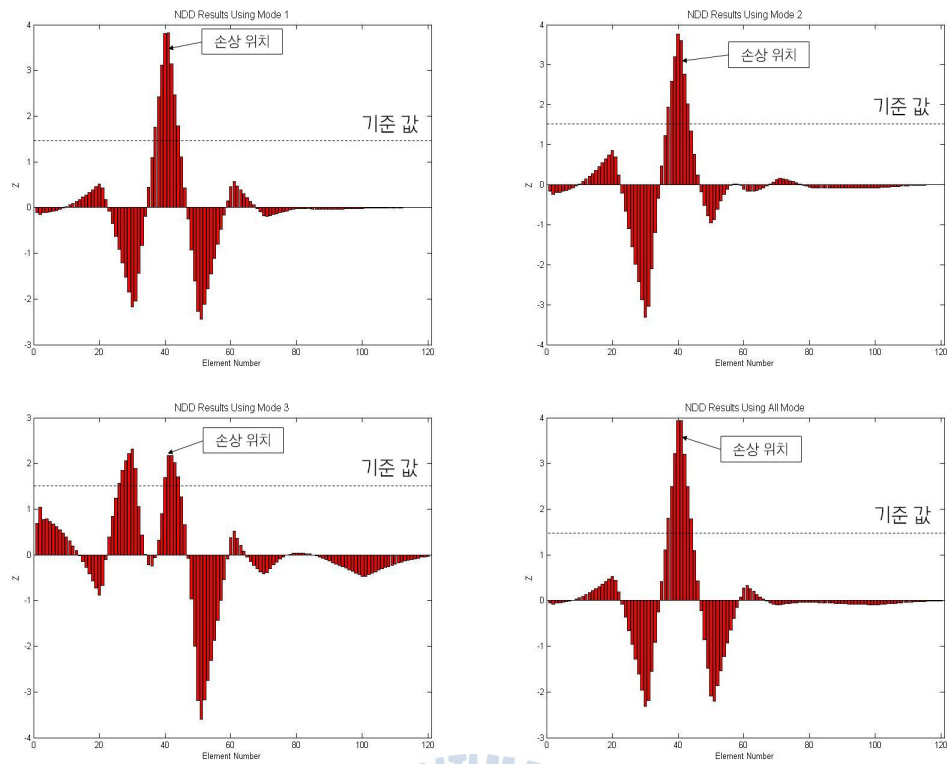


(a) 손상 경우 1

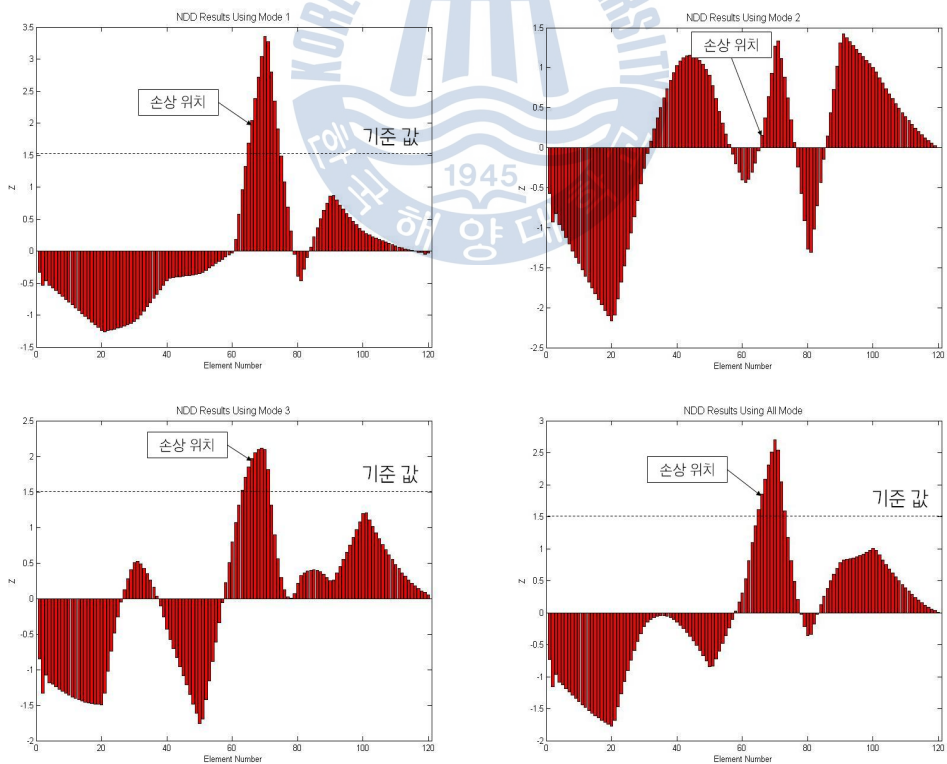


(b) 손상 경우 2

Fig. 45 센서 11개인 경우 손상탐지 결과

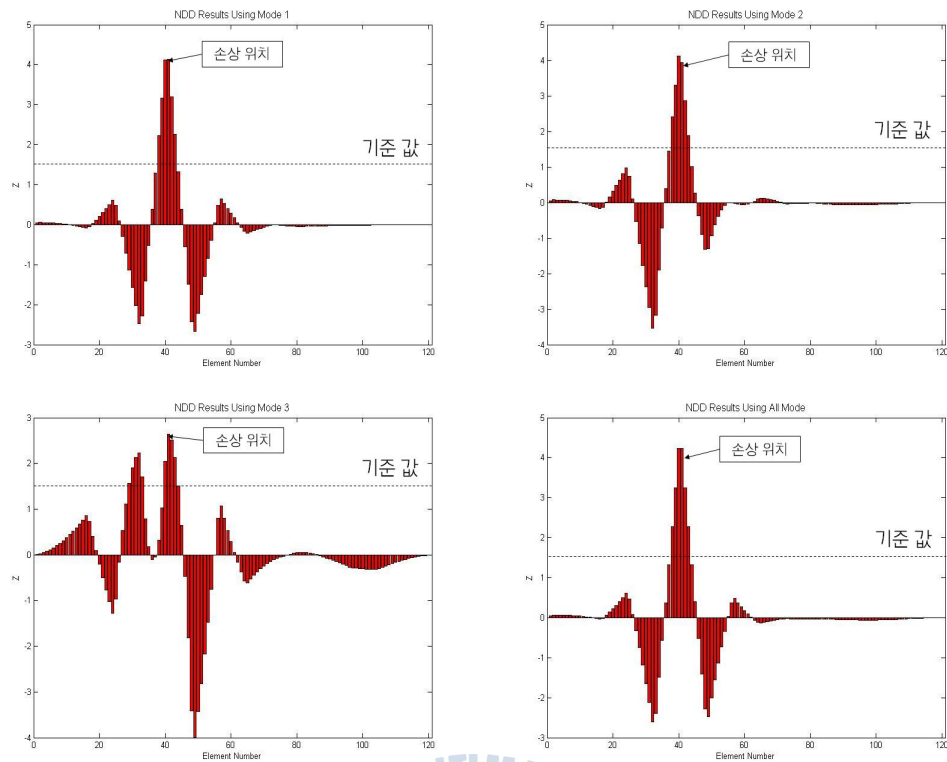


(a) 손상 경우 1

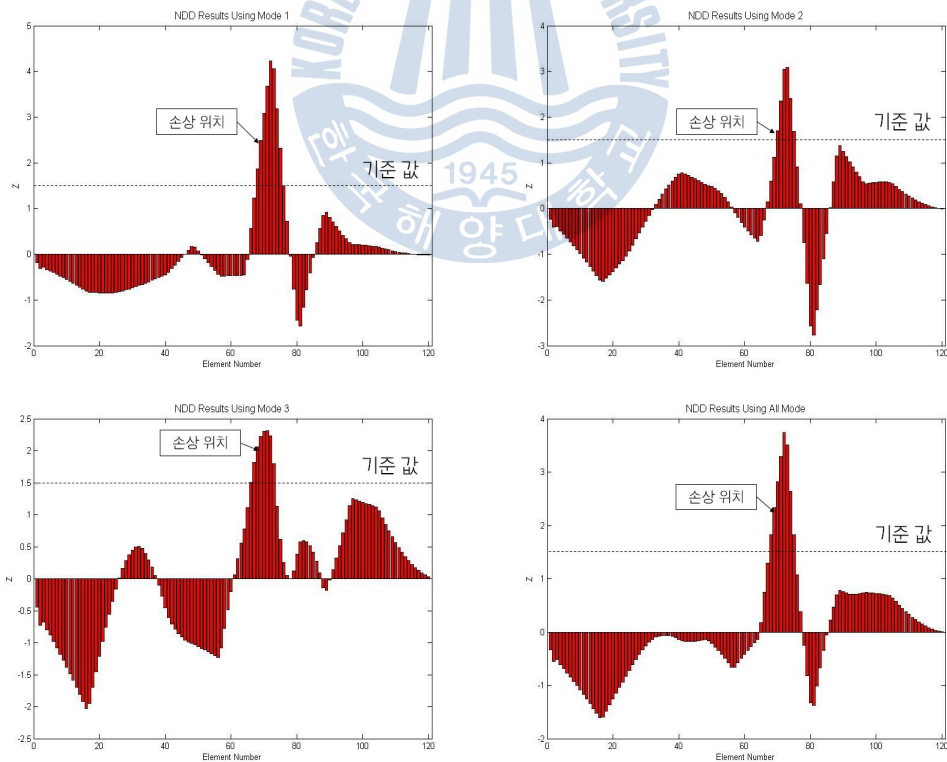


(b) 손상 경우 2

Fig. 46 센서 13개인 경우 손상탐지 결과



(a) 손상 경우 1



(b) 손상 경우 2

Fig. 47 센서 16개인 경우 손상탐지 결과

센서 수와 관계없이 손상 경우 1에서는 3개의 합성 모드를 사용한 경우 손상을 탐지하고 위치를 정확하게 추정하였다. 하지만 손상 경우 2에서는 가설 테스트 기준 값 1.5로 하면 센서 개수 13개부터 손상을 탐지하였으며, 정확한 위치 추정은 못하고 옆으로 시프트(shift) 되는 현상이 발생하였다.

5.3.2 센서 개수 선정

라이저의 손상탐지 기법 적용의 실용성을 위한 센서 개수를 선정하기 위해 수치해석을 실시하고 센서 개수를 감소하면서 기법을 적용하였다. 손상탐지 결과의 성능 평가를 위하여 손상 탐지, 손상 위치 추정으로 평가 항목을 나누었으며, 각 항목마다 Table 14와 같은 기준으로 적절한 센서 개수를 평가하였다. 손상 탐지 성능 항목의 점수는 모의 손상 위치의 손상 지수 값으로 결정을 하며, 손상 위치 추정 항목의 점수 기준은 손상 탐지 결과의 트렌드(trend)에서 피크(peak) 점을 위치 추정 값으로 정하고 실제 손상 위치와의 거리에 따라 점수를 부여하였다.

Table 14 손상탐지 성능평가 기준

기준 점수	손상 탐지	손상 위치 추정
0	탐지 못함	위치 추정 못함
1	가설 테스트 기준 값 0.7에서 손상을 탐지	비슷한 위치 추정 (오차 범위 : 부재 번호 ± 5)
2	가설 테스트 기준 값 1에서 손상을 탐지	비슷한 위치 추정 (오차 범위 : 부재 번호 ± 3)
3	가설 테스트 기준 값 1.5에서 손상을 탐지	정확한 위치 추정

Table 14의 성능평가 기준을 이용하여 각 센서 개수별 손상탐지 성능을 종합하면 Table 15과 같다.

Table 15 센서 개수에 따른 손상 탐지 성능

손상 경우	센서 7개							
	Mode 1		Mode 2		Mode 3		합성모드	
	손상	위치	손상	위치	손상	위치	손상	위치
1	3	3	3	3	0	0	3	3
2	2	1	1	1	1	1	0	0
합 계	9		8		2		6	
총 합	25							
손상 경우	센서 9개							
	Mode 1		Mode 2		Mode 3		합성모드	
	손상	위치	손상	위치	손상	위치	손상	위치
1	3	3	3	3	3	3	3	3
2	2	1	0	0	2	1	1	1
합 계	9		6		9		8	
총 합	32							
손상 경우	센서 11개							
	Mode 1		Mode 2		Mode 3		합성모드	
	손상	위치	손상	위치	손상	위치	손상	위치
1	3	3	3	3	3	1	3	3
2	2	3	1	3	0	0	1	3
합 계	11		10		4		10	
총 합	35							
손상 경우	센서 13개							
	Mode 1		Mode 2		Mode 3		합성모드	
	손상	위치	손상	위치	손상	위치	손상	위치
1	3	3	3	3	3	3	3	3
2	3	2	0	2	3	2	3	2
합 계	11		9		11		11	
총 합	42							
손상 경우	센서 16개							
	Mode 1		Mode 2		Mode 3		합성모드	
	손상	위치	손상	위치	손상	위치	손상	위치
1	3	3	3	3	3	3	3	3
2	3	2	3	2	3	2	3	2
합 계	11		11		11		11	
총 합	44							

센서 개수 7개인 경우 Mode 1, 2에서는 정확한 위치는 아니지만 모든 손상 경우에 손상을 찾아내어 손상 탐지 성능이 높게 나왔다. 하지만 Mode 3에서는 두 경우 모두 손상을 찾지 못하였고, 합성 모드인 경우 손상 경우 1에서만 손상을 탐지할 수 있었다.

센서 개수가 9개인 경우 모든 모드에서 센서 근처의 손상에 대해서는 탐지를 하였으나 센서와 센서 중간에 있는 손상에 대해서는 Mode 1, 3에서만 손상을 탐지하였다.

센서 개수 11개인 경우 센서 개수 9개인 경우와 마찬가지로 손상 경우 1에 대해서는 모든 모드에서 손상을 탐지하였으나 손상 경우 2에서는 Mode 1, 2에서만 손상을 탐지하였고 합성모드에서는 손상을 탐지하였으나 손상지수 0.7로 낮은 신뢰도를 갖는 결과를 나타내었다. 이는 실제 계측을 통해 손상을 탐지할 경우 나타나지 않을 수도 있는 결과이다.

센서개수 13개인 경우 Mode 2에서만 손상 경우 2의 손상을 찾지 못하였으나 Mode 1, 3, 합성모드에서 손상을 정확히 탐지하였고, 위치 또한 비슷한 위치를 추정하였다. 센서 개수 16개인 경우는 모든 손상 경우에 대해서 모든 모드에서 손상을 정확히 찾아내었다.

각 센서 개수별 손상탐지 성능을 보면 센서의 개수가 늘어날수록 합산 점수가 커지는 것을 확인할 수 있다. 실제 생산 라이에 이 기법을 적용하여 건전성 평가를 실시하는 경우 센서 개수 16개 이상의 센서를 이용하는 것이 좋으나, 최소한의 센서 수로 손상 탐지 및 손상 위치를 추정하기 위해서는 13개의 센서를 사용해야 한다고 판단된다.

제 6 장 결 론

본 논문에서는 생산 라이저의 건전성 평가를 위해서 라이저의 파괴 사례 및 모니터링 사례를 분류하였다. 또한 기존의 구조물 손상 평가 기법들을 라이저 수치해석 모델에 적용하여 적합한 기법을 선정하였다. 선정한 손상 평가 기법의 실용성을 위해 센서 수에 따른 손상 탐지를 실시하여 적절한 센서 개수를 선정하였다.

본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 생산 라이저는 Flex joint, Tapered Stress joint 및 Flexible Riser에서 균열 및 피로 파괴 등의 파손 문제가 주로 발생하였다.
2. Top Tensioned Riser의 건전성 모니터링 사례는 일반적으로 라이저 전반에 걸쳐 센서를 부착하여 실시하고 있으며, Steel Catenary Riser의 모니터링 사례는 중요 위치인 Flex joint, Touch Down Zone에서 국부적 모니터링을 실시하고 있다.
3. 기존의 동적 응답을 이용한 손상탐지 기법은 고유진동수, 모드형상, 모드형상의 곡률, 변형 에너지의 변화를 이용한 기법 등이 사용되고 있으며, 이를 수치해석 모델에 각 기법을 적용하여 손상 탐지를 실시한 결과 모달 변형에너지를 이용한 손상탐지 기법의 결과가 손상에 대해 가장 민감한 결과를 나타냈다.
4. 선정한 기법의 실용성을 위해서 수치해석을 통해 센서 개수에 따라 손상탐지를 실시하였으며, 센서 근처의 손상이 있는 경우와 센서와 센서 사이에 손상이 있는 경우에 대해 검토를 하였다. 센서 근처의 손상이 있는 경우 센서 개수와 상관없이 손상을 모두 탐지하였으나, 센서와 센서 중간에 손상이 있는 경우에는 가설테스트 기준 값 1.5의 경우 13개 이상부터 손상을 탐지하였다.
5. 손상 탐지, 손상 위치 추정을 기준으로 성능을 평가한 결과 최소 13개 이상

의 센서를 사용하여야 센서와 센서 중간의 손상까지도 탐지할 수 있다.

6. 본 연구는 단순한 라이저에 해당되며 추후 본 연구를 더욱 발전시켜 복잡한 구조의 라이저 및 여러 환경하중을 고려하여 실제 라이저에 적용할 수 있는 연구가 필요하다.



참고문헌

- 김두기, 2005, 구조동역학, 제2판, 구미서관.
- 박수용, 최상현, 윤성원, 정광량, 2004. 모드 유연성의 변화를 이용한 바닥구조의 손상탐지, 대한건축학회논문집, 20(5), pp.35-42
- 배영일, 2011. 해양 자원 개발의 현재와 미래, 삼성경제연구소.
- 한국해양수산개발원, 2009. 글로벌 해양전략 수립 연구, 한국해양수산개발원.
- 한국해양연구소, 1997. 심해저 광물자원 개발기술 및 환경보존 연구, 과학기술처.
- American Petroleum Institute(API), 1998, *API-Recommended Practise 2RD 1st Edition: Design of Risers of Floating Production systems and tension-leg platform*, API
- American Petroleum Institute(API), 2004, *API-Recommended Practise 5L 43 Edition: Specification for Line Pipe*, API
- An, P., Willis, N., Hatton, S., 2003. *Standalone subsea data monitoring system*, The 6th Underwater Science Symposium, Aberdeen University, Scotland.
- Bai, Y. & Bai, Q., 2005. *Subsea Pipelines and Risers*, Elsevier.
- Chakrabarti S.K., 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*, Computational Mechanics Publications.
- Choi, S. & Stubbs, N., 1997, *Nondestructive Damage Detection Algorithms for 2D Plates*, Smart Structures and Materials, Proceeding of SPIE, 3043, pp.193-204.
- Cook, H.H. & Douglas, E., 2006. *Riser Integrity Management for Deepwater Developments*, Proceedings of Offshore Technology Conference, OTC-17891.
- Cornwell, P., Doebling, S.W., Farrar, C.R., 1999. *Application of the Strain Energy Damage Detection Method to Plate-like Structure*, Journal of Sound and Vibration, 224(2), pp.359-374.

- Det Norske Veritas(DNV), 2001. *Dynamic Risers*, Det Norske Veritas.
- Douaron, S.L., Vuattier, C. Perromat V., 2009. *Akpo riser integrity monitoring system design, deployment, commissioning and start-up*, Deep Offshore Technology(DOT) Interational Conference.
- Duffey, T.A., Farrar, C.R., Doebling, S.W., 1998. *Damage Detection for Applications Undergoing Axial (Membrane) Response*, Proceedings of the 6th International Modal Analysis Conference(IMAC), pp.1782-1792.
- Fox, C.H.J., 1992. *The location of defects in structures : a comparison of the use of natural frequency and mode shape data*, Proceedings of the 10th international Modal Analysis Conference.
- Furnes, G.K., Hassanein, T., Halse K.H., Ericksen, E., 1998. *A Field Study of Flow Induced Vibration on a Deepwater Drilling Riser*, Proceedings of Offshore Technology Conference, OTC-8702.
- GOM OCS Region, 2004. *Safety Alert No. 222 - Riser Flexible Joint*, U.S. Department of the Interior Minerals Management Service Gulf of Mexico OCS Region.
- Halil, D., 2012. *Riser Concepts for deep waters*, Ph. D. Norwegian University of Science and Technology.
- HSE, 1998, *Monitoring Methods for Unbonded Flexible Pipe*, Health & Safety Executive.
- Ho, Y. & Ewins, D., 2000, *On the structural damage identification with mode shapes*, Pceedings of the European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, pp.677-686.
- Joint Industry Project(JIP), 2004, *Full-Scale Monitoring MARCO POLO*, Marin reference 19811, JIP.
- Karayaka, M. & Ruf, W., 2009. *STEEL CATENARY RISER RESPONSE CHARACTERIZATION WITH ON-LINE MONITORING DEVICES*, Proceedings of 28th International Conference on Offshore Mechanics and arctic Engineering, OMAE2009-79437.
- Karayaka, M. Chen, J.H., Ruf, W., Podskarbi, M., 2009. *Tahiti Online Monitoring System for Steel Catenary Risers and Flowlines*, Proceedings of Offshore Technology Conference, OTC-19860.

- Kluk, D.J., McNeill, S.I., Bhalla, K.K., Saruhashi, T., Sawada I., Kyo, M., Miyazaki, E., Yamazaki, Y., 2013. *Development of a Real-Time Riser Fatigue Monitoring System*, Proceedings of Offshore Technology Conference, OTC-24216.
- Liven, N.A.J. & Ewins, D.J., 1988. *Spatial correlation of mode shapes : the coordinate modal assurance criterion (COMAC)*, Proceedings of the 6th International Modal Analysis Conference (IMAC).
- Mansour, G., Jukes, P., Skinner, J., 2007. *Deepwater risers design, fatigue life and standards study report*, JP Kenny
- Marinho, M.G., Camerini, J.M., Dos Santos, Pires, G.P., Petrobras, 2007, *Surface Monitoring Techniques for a Continuous Flexible Riser Integrity Assessment*, Proceedings of Offshore Technology Conference, OTC-18946.
- OrcaFlex, 2010. OrcaFlex Manual, Orcina Ltd.
- Pandey, A.K., Biswas, M., Samman, M.M., 1991. *Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes*, Journal of Sound and Vibration, 169(1), pp.3-17.
- Peters, D.J.H., Zimmer, R.A., Hein Jr., N.W., Wang, W.J., 1990. *Weight Control, Performance Monitoring, and In-Situ Inspection of the TLWP*, Proceedings of Offshore Technology Conference, OTC-6363.
- Roderick, Y., Edwards, Jr., Hennessy, W.F., Campan, C.R., 1999, *Load Monitoring at the Touchdown Point of the First Steel Catenary Riser Installed in a Deepwater Moored Semisubmersible Platform*, Proceedings of Offshore Technology Conference, OTC-10975.
- Rytter, A., 1993. *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures*, Ph. D. Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg.
- Salawu, O.S. & Williams, C., 1995. *Bridge assessment using forced-vibration testing*, Journal of Structural Engineering, 121(2), pp.161-173.
- SBM Atlanta, 2011. *Steel Catenary Riser (SCR) Studies*, SBM Offshore
- Seyed, F.B., 1989. *On the Dynamics of Flexible Riser and Suspended Pipe Spans*, Ph. D. Department of Mechanical Engineering, University of London.

- Sohn, H, Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk, D.D., Stinemates, D.W., Nadler, B.R., Czarnecki, J.J., 2004. *A Review of Structural Health Monitoring Literature*, Los Alamos National Laboratory.
- Srinivasan, M.G. & Kot, C.A., 1998, *Damage Index Algorithm for a Circular Cylindrical Shell*, Journal of Sound and Vibration, 215(3), pp.587-591.
- Stubbs, N., Kim, J.T., Topole, K., 1992. *An Efficient and Robust Algorithm for Damage Localization in Offshore Platforms*, American Society of Civil Engineers(ASCE) 10th Structures Congress '92, 1, pp.513-546.
- Stubbs, N., Kim, J.T., Farrar, C.R., 1995. *Field Verification of a Nondestructive Damage Localization and Severity Estimation Algorithm*, Proceedings of International Modal Analysis Conference(IMAC) 13th, 1, pp.210-218.
- Stubbs, N. & Kim, J.T., 1996. *Damage Localization in Structures without Baseline Modal Parameters*, Journal of The American Institute of Aeronautics and Astronautics(AIAA), 34(8), pp.1644-1649.
- Stubbs, N., Park, S., Sikorshy, C., Choi, S., 2000. *A Global Non-destructive Damage Assessment Methodology for Civil Engineering Structures*, International Journal of Systems Science, 31(11), pp.1361-1373.
- Wahab, M.M.A. & Roeck, G.D., 1999. *Damage detection in Bridges Using Modal Curvature : Application to a Real Damage Scenario*, Journal of Sound and Vibration, 226(2), pp.217-235.
- West, W.M., 1984. *Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen*, Proceedings of the Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity.
- Wolff, T. & Richardson, M., 1989. *Fault Detection in Structures from Changes in their Modal Parameters*, Proceedings of the 7th international Modal Analysis Conference.